陈小婷，赵强，高宇星，等，2023. 秦岭北麓两次下山雷暴不同演变特征分析[J]. 气象，49(8)：932-945. Chen X T，Zhao Q，Gao Y X，et al，2023. Evolution characteristics of two down-to-hill thunderstorms at the northern foot of Qinling Mountains[J]. Meteor Mon，49(8)：932-945(in Chinese).

秦岭北麓两次下山雷暴不同演变特征分析*

陈小婷[1,2]　赵　强[1,2]　高宇星[3]　肖贻青[1]

1 陕西省气象台，西安 710014

2 秦岭和黄土高原生态环境重点实验室，西安 710016

3 西安市气象局，西安 710016

提　要： 2018 年 7 月 26 日和 29 日，秦岭北麓雷暴下山形成阵风锋并均在关中平原造成强对流天气，雷暴下山后强度、移动速度以及影响范围差异大，预报难度大。利用多源观测资料及 ERA5 再分析资料分析这两次过程(分别简称为 7・26 过程和 7・29 过程)的差异及成因。结果显示：7・26 过程雷暴组织化程度高、生命史长、冷池小时最大变温为 16℃，产生大范围短时强降水和雷暴大风；7・29 过程以孤立普通单体的生消为主，冷池小时最大变温为 8℃，仅造成秦岭沿山局地短时强降水。7・26 过程发生在副热带高压西北侧，中低层暖平流发展使不稳定能量增长，关中平原上升运动及北山地形抬升为雷暴移入后发展加强提供了有利的动力条件；7・29 过程发生在副热带高压南侧，关中平原以下沉运动为主，不利于雷暴移入后进一步发展加强。7・26 过程阵风锋移动方向与边界层风向相反，又与风暴承载层平均风向相同，有利于对流垂直发展，对流发展过程中低层垂直风切变逐步增大，与冷池强度保持同步增长；7・29 过程阵风锋移动方向和边界层风向相同，低层辐合弱，整个过程中 0～3 km 风矢量差始终不足 5 m・s^{-1}，不利于对流组织化发展。特殊地形对冷池的移动方向及强度产生了影响：7・26 过程强的西南出流使冷池呈东北—西南狭长带状沿平原南边界向东北推进，冷池势力集中，移速快，强的辐合触发新对流发展；7・29 过程冷池在黄土台塬地形过渡区扩散传播，东南风和西南风出流使对流分裂，冷池强度减弱，不利于新对流触发。

关键词： 阵风锋，冷池，垂直风切变，秦岭地形

中图分类号： P458　　**文献标志码：** A　　**DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.061201

Evolution Characteristics of Two Down-to-Hill Thunderstorms at the Northern Foot of Qinling Mountains

CHEN Xiaoting[1,2]　ZHAO Qiang[1,2]　GAO Yuxing[3]　XIAO Yiqing[1]

1 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

2 Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710016

3 Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016

Abstract: On 26 July 2018 (shortly for "7・26") and 29 July 2018 (shortly for "7・29"), the gust front formed by the cold outflow caused severe convective weather in the Guanzhong Plain, but their intensities, moving speeds and impact ranges were quite different. The difference characteristics and main reasons of the two down-to-hill thunderstorms are analyzed by using the ERA5 reanalysis data and multiple observation data. The results show that the "7・26" thunderstorm was highly organized, with a long lifespan and the maximum temperature change of 16℃・h^{-1} within the cold pool, thus resulting in a wide range of

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J031)、陕西省自然科学基础研究计划项目(2022JQ-248)、秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室重点基金课题(2020K-1)共同资助

2022 年 11 月 8 日收稿；　2023 年 6 月 12 日收修定稿

第一作者：陈小婷，主要从事灾害天气机理及预报方法研究. E-mail：tsing_508@126.com

通讯作者：赵强，主要从事灾害天气机理及预报方法研究. E-mail：zhaoq66@sina.com

short-time severe rainfall and thunderstorm gale. By contrast, the "7 • 29" storm was dominated by isolated thunderstorm cells, and the maximum temperature change of the cold pool was 8℃ • h^{-1}, which only caused the localized short-time severe rainfall along the Qinling Mountains. The "7 • 26" thunderstorm occurred on the northwest side of the subtropical high, the warm advection development of the middle and low layers increased the unstable energy, the upwelling movement in Guanzhong Plain and the uplift effect of the topography of Beishan provided favorable dynamic conditions for the development of thunderstorms after they moved in. However, the "7 • 29" storm occurred on the south side of the subtropical high and the downdraft in Guanzhong Plain was not conducive to the development of convection after the storms move in. The moving direction of the "7 • 26" gust front was opposite to the wind direction in the bounary layer, but parallel to the average wind direction of the storm bearing layer, which was beneficial to the convection vertical development. The low-level vertical wind shear strengthened gradually, increasing synchronously with the strength of cold pool in the course of convection development. The movement direction of the "7 • 29" gust front was the same as the wind direction of the boundary layer, the low-level convergence was weak, and the 0－3 km wind vector difference was always less than 5 m • s^{-1} during the whole process, which was not conducive to the development of convection. The special terrain affected the movement direction and intensity of the cold pool. The strong southwest outflow during the "7 • 26" process made the cold pool move forward along the southern boundary of the plain in a narrow strip from southwest to northeast, the cold pool was concentrated and moved fast, and the strong convergence triggered the development of new convection. During the "7 • 29" process, the cold pool spread in the terrain transition area of the loess tableland, and the outflow of southeast wind and southwest wind split the convection. The intensity of the cold pool was constantly weakened, which was not favourable for the development of new convection.

Key words: gust front, cold pool, vertical wind shear, Qinling Mountains topography

引　言

强对流天气是导致气象灾害的重要天气类型,具有局地性强、发展迅速、持续时间短等特点,预报预警难度大。研究强对流天气,对于防灾减灾意义重大。许多研究发现,边界层中尺度辐合线对强对流天气的形成演变有重要作用(孙继松,2023;雷蕾等,2021;万夫敬等,2021;关晓军和覃靖,2019;赵强等,2022),而阵风锋是主要的边界层辐合线类型之一(陈明轩等,2017)。在对流系统中,降水、蒸发、冷却导致冷空气不断下沉并向前扩展,从而在对流下方近地面形成冷空气堆,也叫冷池,冷池的前沿就是阵风锋(或称出流边界)。阵风锋对雷暴发展的作用需视具体情况而言。一方面,与阵风锋相联系的对流云团中因为有新的对流单体补充而迅速发展,产生更剧烈的强对流天气(郑丽娜和刁秀广,2016;胡文东等,2021);另一方面,阵风锋切断了暖湿入流而使得雷暴减弱(刘勇等,2007;武麦凤等,2017)。根据 Wilson et al(1998)参照针对飑线维持机制的 RKW 理论(Rotunno et al,1988)建立的概念模型,雷暴生成后,要想加强或维持其强度,与低层垂直风切变相对于雷暴出流边界的方向有关:当大气边界层风向与雷暴出流边界移动方向相反,且边界层以上的风与雷暴出流边界移动方向相同时,对流容易在垂直方向上发展,有利于雷暴的加强和维持。一些实例证明,对流触发后能否维持与飑线维持机制有类似之处(陈双等,2011;俞小鼎等,2020;高帆等,2022;彭霞云等,2022),当冷池和低层垂直风切变强度相当时,冷池产生的负涡度与低层垂直风切变产生的正涡度达到近似的平衡状态,冷池前沿的上升气流垂直性最强,因此最易沿着出流边界形成新的对流单体,从而最有利于对流的发展传播。

山区由于其特殊地形,更容易满足对流所需的热动力条件,使得雷暴天气更容易在山区发生(孙继松和陶祖钰,2012),雷暴形成的冷池会沿着山坡加速下滑,使出流边界快速移动(陈明轩等,2017;王丛梅等,2017;陈双等,2011),影响平原地区。关于雷

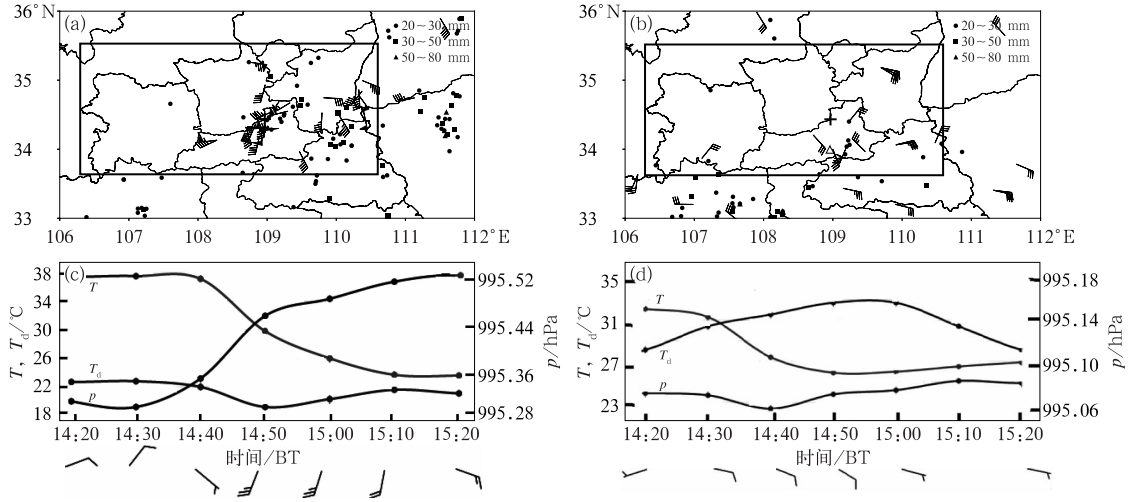
暴下山后如何发展影响平原地区的问题，针对京津冀地区已进行了较多的研究（陈双等，2011；张文龙等，2014）：程文静等（2023）统计分析了 2011—2020 年太行山东麓对流风暴下山演变的气候特征；陈明轩等（2017）研究显示，出流边界“碰撞”及其与环境热动力场之间的相互作用，配合地形强迫，是北京地区超级单体雷暴形成和发展的主要原因；孙靖和程光光（2017）分析了弱天气环流背景下，多个 γ 中尺度雷暴下山进入北京城区后的强度变化，认为追踪城区热动力条件是成功预报此类天气的关键因素。

陕西关中地区地形复杂，中部渭河冲积平原（海拔约为 325～600 m）呈“新月”状介于秦岭（海拔约为 1500～3000 m）和北山（海拔约为 800～1800 m）之间，西安城区位于平原中部，其东南部骊山（海拔为 1302 m）与秦岭间为遍布沟壑的黄土台塬（海拔约为 500～1000 m）。秦岭山区雷暴下山后增强或减弱是当地短时临近预报的重点和难点，伴有阵风锋的雷暴下山后如果加强，将迅速影响人口密度高的关中城市群，给国民经济和人民生命财产带来极大威胁。2018 年 7 月 26 日（以下简称 7・26 过程）和 7 月 29 日（以下简称 7・29 过程）午后秦岭山区强烈发展的雷暴下山后，均在关中地区出现了阵风锋触发的强对流天气，阵风锋出现的时间、地点和回波特征非常相似，雷暴下山后的强度和影响范围变化迅速，强对流天气影响迥异，预报难度大。本文利用常规气象探空资料、分钟级加密自动站资料、西安泾河站多普勒雷达及风廓线雷达资料、ERA5 逐小时再分析资料（分辨率为 0.25°×0.25°），对比分析两次过程雷暴发展演变特征以及环境热动力条件、冷池和地形在雷暴发展演变中的作用，总结秦岭下山雷暴造成关中地区强对流天气的预报着眼点，希望加深预报员对此类天气的认识，从而有助于提高大城市预报预警能力。

1 天气实况

2018 年 7 月 26 日 08:00（北京时，下同）关中地区地面气温为 28～30℃，露点温度为 21～23℃，偏东风风速为 2～4 m・s^{-1}，午后气温上升至 35～38℃，大部分站点露点温度上升 1～2℃，偏东风风速增大至 3～6 m・s^{-1}。13:00—19:00（图 1a）关中中东部出现 27 站次 20 mm・h^{-1}以上的短时强降水，最大雨强为 47 mm・h^{-1}；25 站次出现 8 级以上大风天气，极大风速为 29 m・s^{-1}。西安泾河站地面气象要素监测显示（图 1c），14:40—15:10 气温下降 13.4℃，风向由东北风转为西南风（10.1 m・s^{-1}）。

7 月 29 日 08:00 关中地区地面气温为 26～28℃，



注：图 a，b 中风向标分别代表 8 级以上、6 级以上大风；矩形方框为关中地区大致范围，南边界为秦岭；“十”字为西安泾河探空站位置，空心三角为长安站位置；黑色圆点、方块、实心三角分别代表不同小时降水量。

图 1 2018 年 7 月（a）26 日 13:00—19:00，（b）29 日 13:00—19:00 强对流天气实况及（c）26 日 14:20—15:20 泾河站，（d）29 日 14:20—15:20 长安站阵风锋过境时气象要素演变

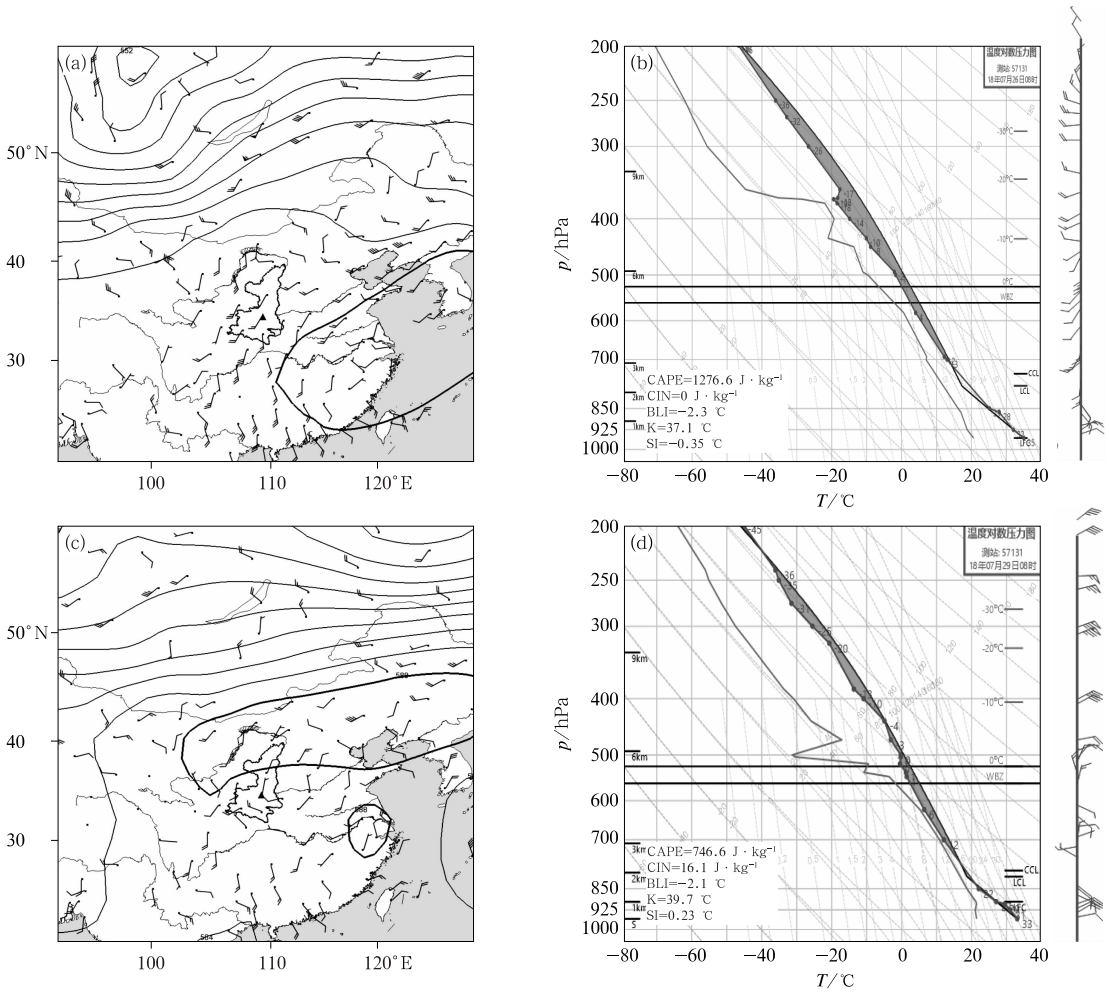
Fig. 1 (a, b) Observation of severe convective weather in (a) 13:00－19:00 BT 26 and (b) 13:00－19:00 BT 29, and (c, d) meteorological elements evolution during gust front passing in (c) 14:20－15:20 BT 26 at Jinghe Station, and (d) 14:20－15:20 BT 29 at Changan Station in July 2018

露点温度为 22～24℃,偏东风风速为 2～6 m·s^{-1},午后气温上升至 33～35℃,大部分站点露点温度和风速没有明显变化。13:00—19:00(图 1b)关中南部出现 9 站次短时强降水,最大雨强为 30 mm·h^{-1};10 站次 6 级以上大风天气,极大风速为 14.3 m·s^{-1}。长安站(图 1d)气象要素演变显示,14:20—14:50 气温下降 6℃,风向由偏西风(2 m·s^{-1})转为偏东风(4 m·s^{-1})。

对比而言,7·26 过程气象要素变化剧烈,对流强度强,大风、短时强降水天气造成关中中东部多处绿化树木被大风刮断、刮倒,多路段积水严重,给城市交通运行带来极大不便;7·29 过程以短时强降水为主,仅影响关中南部沿山地区。

2　环流背景

2018 年 7 月 26 日 08:00(图 2a),500 hPa 西太平洋副热带高压(以下简称副高)东北—西南向控制日本岛至我国华东地区,热带风暴云雀位于日本岛东南方向,陕西位于副高西北侧,陕北南部至甘肃南部存在浅槽,对应位置 400～200 hPa 均处于槽区,中上层动力强迫明显,有利于上升运动发展。700 hPa 切变位于宁夏西部,陕西中南部位于切变东侧,为 6～8 m·s^{-1}的西南气流,850 hPa(图略)关中地区以东南气流为主,存在 25℃的暖中心,有利于上冷下暖的不稳定层结建立。7 月 29 日 08:00(图 2c)



注:图 a,c 中等值线为 500 hPa 高度场,风羽为 700 hPa 风场;三角代表西安泾河站。

图 2　2018 年 7 月(a)26 日,(c)29 日 08:00 环流形势,和
(b)26 日,(d)29 日 14:00 西安泾河站经订正后探空曲线

Fig. 2　(a, c) Weather situations at (a) 08:00 BT 26 and (c) 08:00 BT 29, (b, d) T-ln$p$ diagram corrected at Jinghe Station of Xi'an at (b) 14:00 BT 26 and (d) 14:00 BT 29 July 2018

副高呈东西带状位于华北至河套，关中地区位于其南侧，副高南侧东北气流和陕南地区东南气流在秦岭形成弱切变，对应700 hPa上秦岭沿线存在切变线，850 hPa(图略)关中地区同样为东南气流，四川东北部存在低涡切变，秦岭山区及以南地区处于低涡东北象限东南气流中，低层气旋式辐合有利于上升运动发展。

泾河探空站08:00环境参数(表1)及14:00订正探空(图2b,2d)对比可见：7·26过程和7·29过程08:00对流有效位能(CAPE)均较弱，订正后分别为约1280、750 J·kg^{-1}，垂直风切变弱，0～3 km风矢量差分别为7.7、3.0 m·s^{-1}。7·26过程700、850 hPa温度露点差大，午后气温上升至37℃，中层相对干的环境气层和中下层较大的温度垂直递减率有利于对流大风形成(王秀明等，2023)。7·29过程中层存在干层，同样有利于大风形成，但低层温度露点差小于3℃，前期云量多于7·26过程，不利于地面辐射增温，午后气温低于7·26过程，不利于冷池出流和环境大气形成较大的温度梯度。可见两次过程均具备产生对流的基本条件，7·26过程能量和垂直风切变比7·29过程强，产生雷暴大风的潜势更高。

表1 两次过程泾河站08:00探空环境参数

Table 1 Environmental parameters of Jinghe Sounding Station at 08:00 BT

过程	2 m温度,露点温度/℃	700,850 hPa温度露点差/℃	700,850 hPa比湿/(g·kg^{-1})	对流有效位能/(J·kg^{-1})	0～3 km风矢量差/(m·s^{-1})	整层可降水量/mm
7·26过程	30,21	6,9	9,13	280	7.7	48
7·29过程	28,22	1,3	12,16	50	3.0	54

3 雷暴发展演变特征

3.1 平原地区阵风锋初现阶段回波特征

7月26日12:00前后秦岭南麓迎风坡对流发展，在西南风引导下向北移动，13:30前后下山的对流云团与平原地区分散的对流单体合并后迅速增强(图略)。13:50西安泾河站雷达0.5°仰角基本反射率因子图上可见阵风锋(图3a)，其后部多单体雷暴反射率因子最强达到69 dBz(图3b)，速度图上伴有大风核，中心高度为0.9 km，退模糊后风速可达25 m·s^{-1}(图3c)。最强单体垂直剖面显示(图3g)，13:44最强反射率因子大于9 km，沿前侧入流方向呈明显倾斜结构，表明存在强上升运动；一个体扫后强反射率因子核下降至4.5 km左右，移动前方阵风锋开始明显；13:56强回波及地，受强下沉气流影响，阵风锋快速向前推进；14:02母体雷暴减弱，前方阵风锋移动过程中与平原地区水平对流卷(图3b，俞小鼎等，2012；崔新艳等，2021)垂直相遇，触发一系列新单体强烈发展。

7月29日12:14秦岭东段多个分散单体发展、加强，向北移动并逐渐下山(图略)。由14:02(图3d～3f)西安泾河站0.5°仰角基本反射率因子图上可见，阵风锋长度、离开雷暴母体的距离与7·26过程相当，雷暴最强回波达65 dBz，后侧入流达14 m·s^{-1}，强回波中心高度为约5 km，且具有快速下降的特征(图3h)。相比而言，两次过程雷暴初生阶段回波强度大，移动前方伴有明显阵风锋，阵风锋后部有后侧入流；7·26过程强回波初始高度更高，后侧入流更强，具有悬垂结构。

3.2 平原地区雷暴发展移动特征

7·26过程阵风锋向东北方向移动，多单体强雷暴生命史为4 h。14:07阵风锋与平原地区水平对流卷垂直相遇触发的一系列新单体强烈发展(图4a)，随后多个对流单体合并(图4b)，由立体图(图4i)可以看出雷暴组织化程度高，随着下沉气流发展，回波及地，表现出低质心的特点，地面降水迅速向北推进影响西安城区，星火立交站14:20—14:30雨量达12 mm，阵风锋前侧入流形成的上升气流使雷暴具有悬垂结构。出流边界前进过程中先和东北方向A单体相遇，使东段阵风锋后部雷暴合并加强(图4b,4c)，后与西北方向B单体形成的阵风锋相遇(图4c)，触发新对流发展、合并，形成大范围强回波及共同的出流边界(图4c,4d)，并快速向东北方向推进，关中中东部西安、咸阳、渭南三个城市主城区受到强对流天气影响。15:00后随着阵风锋远离，母体雷暴逐渐减弱，16:40左右在关中东北部再次遇到雷暴单体合并加强(图略)，18:00强对流天气影响趋于结束。

7·29过程阵风锋自东南向西北偏西方向移

动,由 4 个发展成熟且相对独立的雷暴形成,其中 B 单体发展最旺盛(图 4e)。14:13(图 4f,4j)B 单体最强回波达 62 dBz,50 dBz 回波高度约为 3 km,B、C 单体相对孤立,组织化程度不高,雷暴结构竖直,不利于上升运动和下沉运动分离。D 单体维持 20 余分钟后减弱、消散,北段阵风锋向西北方向弧形扩散,基本无新生对流发展(图 4g)。南段阵风锋后部雷暴发展相对明显,阵风锋由西北移逐渐转为向西北偏西方向移动,在秦岭北麓沿山相继触发孤立雷暴生消(图 4h),强回波高度一般在 5 km 以下,质心在 3 km 以下,仅造成关中南部沿山地区局地短时强降水及 6~7 级大风天气,16:00 之后对流天气结束。

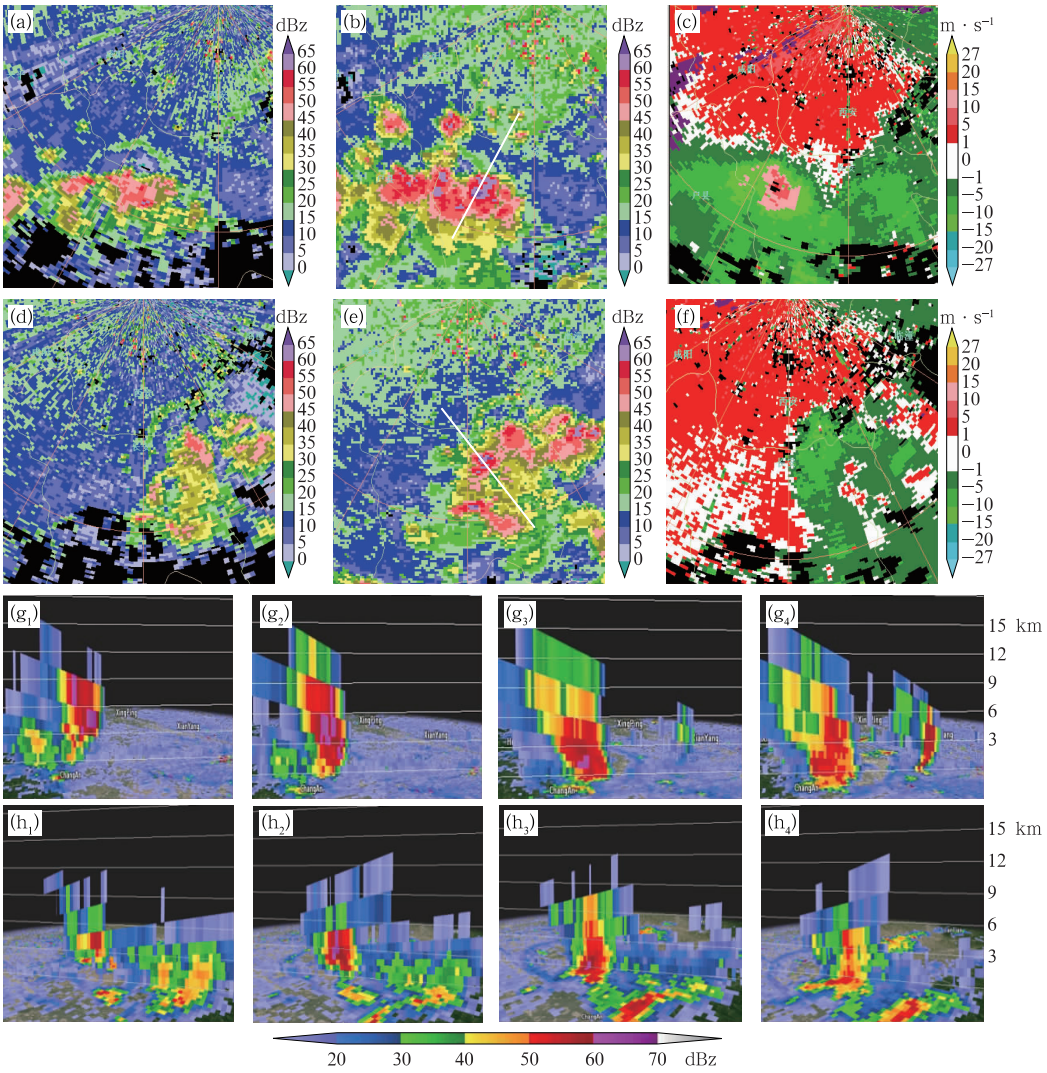


图 3　2018 年 7 月(a~c)26 日 13:50,(d~f)29 日 14:02 西安泾河站(a,d)0.5°仰角基本反射率因子、(b,e)组合反射率、(c,f)0.5°基本速度,和(g) 26 日 13:44—14:02 沿图 3b 中白线,(h)29 日 13:56—14:13 沿图 3e 中白线的逐 6 分钟反射率因子垂直剖面

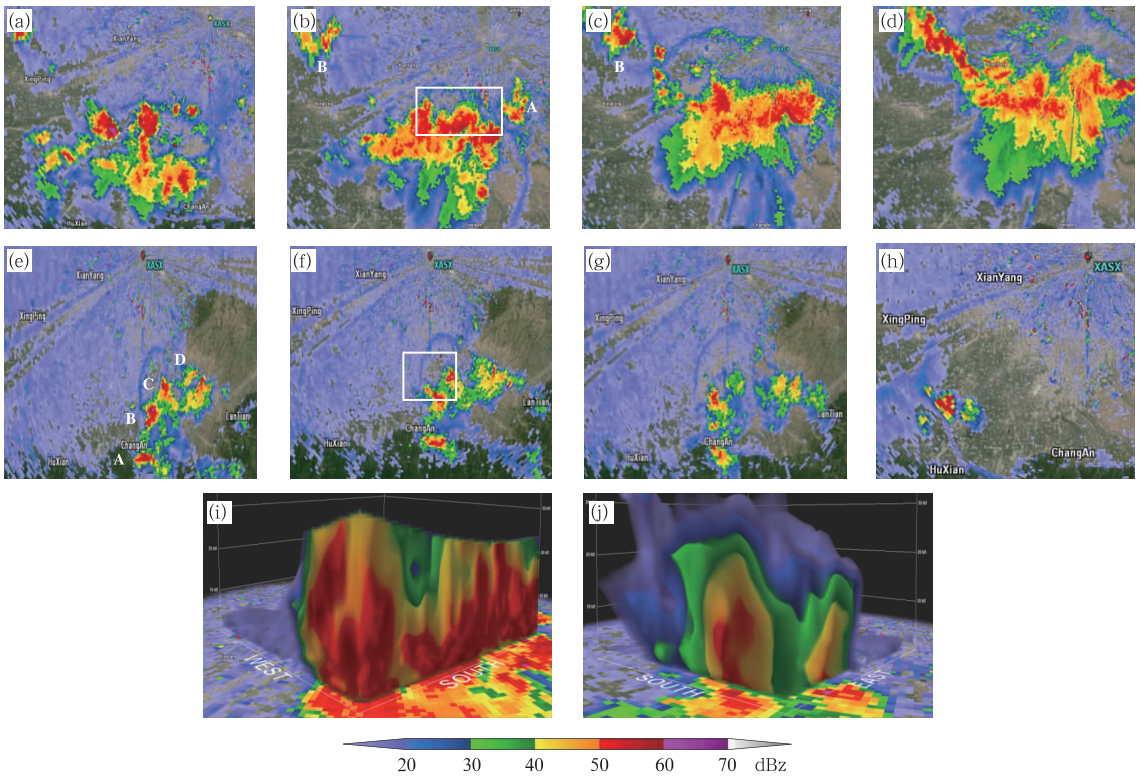
(g_1)13:44,(g_2)13:50,(g_3)13:56,(g_4)14:02,

(h_1)13:56,(h_2)14:02,(h_3)14:08,(h_4)14:13

Fig. 3　(a, d) The 0.5° radar reflectivity factor, (b, e) composite reflectivity, (c, f) 0.5° radar velocity at (a—c) 13:50 BT 26 and (d—f) 14:02 BT 29, and (g, h) vertical profiles of 6 min reflectivity at Jinghe Radar Station in (g) 13:44—14:02 BT 26 along the white line in Fig. 3b, and (h) 13:56—14:13 BT 29 along the white line in Fig. 3e in July 2018

(g_1) 13:44 BT, (g_2) 13:50 BT, (g_3) 13:56 BT, (g_4) 14:02 BT,

(h_1) 13:56 BT, (h_2) 14:02 BT, (h_3) 14:08 BT, (h_4) 14:13 BT



注:字母 A～D 标记对流单体。

图 4 2018 年 7 月(a～d)26 日和(e～h)29 日西安泾河站雷达 0.5°仰角基本反射率因子以及(i,j)雷暴立体图
(a)14:07, (b)14:24, (c)14:41, (d)14:52,(e)14:08, (f)14:13, (g)14:36,(h)15:56,
(i)图 4b 方框区域内的西南视角, (j)图 4f 方框区域内的东南视角

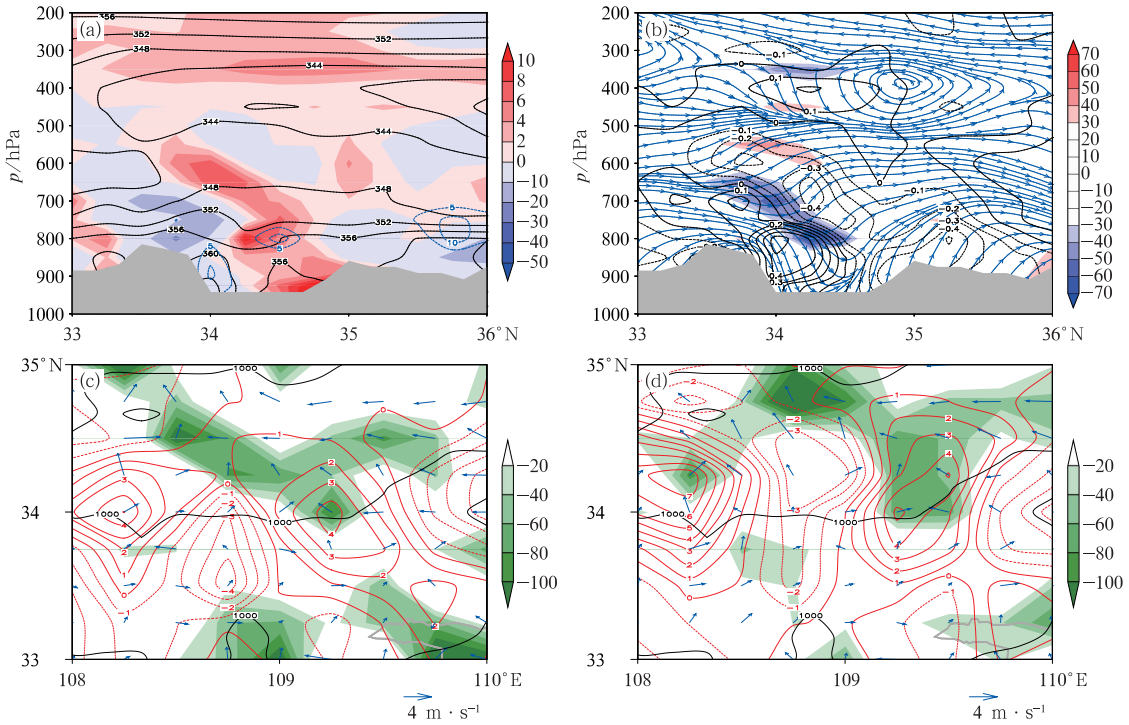
Fig. 4 The 0.5° radar reflectivity factor (a—d) on 26, (e—h) on 29 July 2018 and
(i, j) 3D picture of the thunderstorm at Jinghe Radar Station
(a) 14:07 BT, (b) 14:24 BT, (c) 14:41 BT, (d) 14:52 BT, (e) 14:08 BT, (f) 14:13 BT, (g) 14:36 BT, (h) 15:56 BT,
(i) looking from southwest of the box area in Fig. 4b, (j) looking from southeast of the box area in Fig. 4f

4 对流系统演变差异成因探讨

4.1 平原地区热动力条件

7 月 26 日 12:00(图 5a,5b)关中平原假相当位温呈“上低下高”的不稳定状态,500 hPa 以下偏南风带来较强暖平流,中低层大部分为上升运动,大值中心位于 700 hPa 附近及北山山前,仅秦岭北麓沿山一带存在下沉运动和弱的冷平流。平原地区大范围暖平流及上升运动,一方面有利于层结不稳定进一步增大,另一方面有利于对流系统移入后进一步发展。午后,关中平原 2 m 气温不断上升,15:00 大部分站点大于 35℃,东部最高可达 40℃(图略),近地层热力不稳定度增强。随着雷暴下山,秦岭北麓偏南风增强,扰动温度负值区不断向平原地区侵入,与暖的偏东气流辐合(图 5c),并不断向北推进。15:00 对流主体位于平原中部(图 4d),冷池中心温度达到 23℃,与环境大气间形成强的扰动温度梯度,强的冷池出流与平原北部偏东风或东南风辐合,在地形抬升的共同作用下,北部山前地面辐合显著增强(图 5d),触发新的对流发展。

7 月 29 日 12:00 关中地区大气也呈不稳定状态,其中秦岭和北部山区暖湿条件优于平原地区,秦岭北麓近地面假相当位温垂直梯度大,伴有明显的锋生(图 6a),阵风锋向西北移动过程中,秦岭沿山地区不断有孤立对流触发,使其西移分量增加,这和该地区热动力条件更有利有密切关系。关中平原处于副高南侧,没有明显的冷暖平流,除近地层及地形迎风坡存在浅薄的上升运动外,其余以下沉运动为



注：图 a，b 中灰色阴影为地形，图 c，d 中黑色等值线为 1000 m 地形线。

图 5　2018 年 7 月 26 日(a，b)12：00 沿 109°E 的(a)假相当位温(黑色等值线，单位：K)、温度平流(填色，单位：10^{-5} K·s^{-1})、锋生函数(蓝色等值线，单位：10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1})，(b)垂直速度(等值线，单位：Pa·s^{-1})、流场(v 和 w，蓝色流线，单位：m·s^{-1})、散度(填色，单位：10^{-6} s^{-1})的垂直剖面，及(c)14：20，(d)15：00 的地面风场(风矢)、散度(填色，单位：10^{-5} s^{-1})、扰动温度(红色等值线，单位：℃)

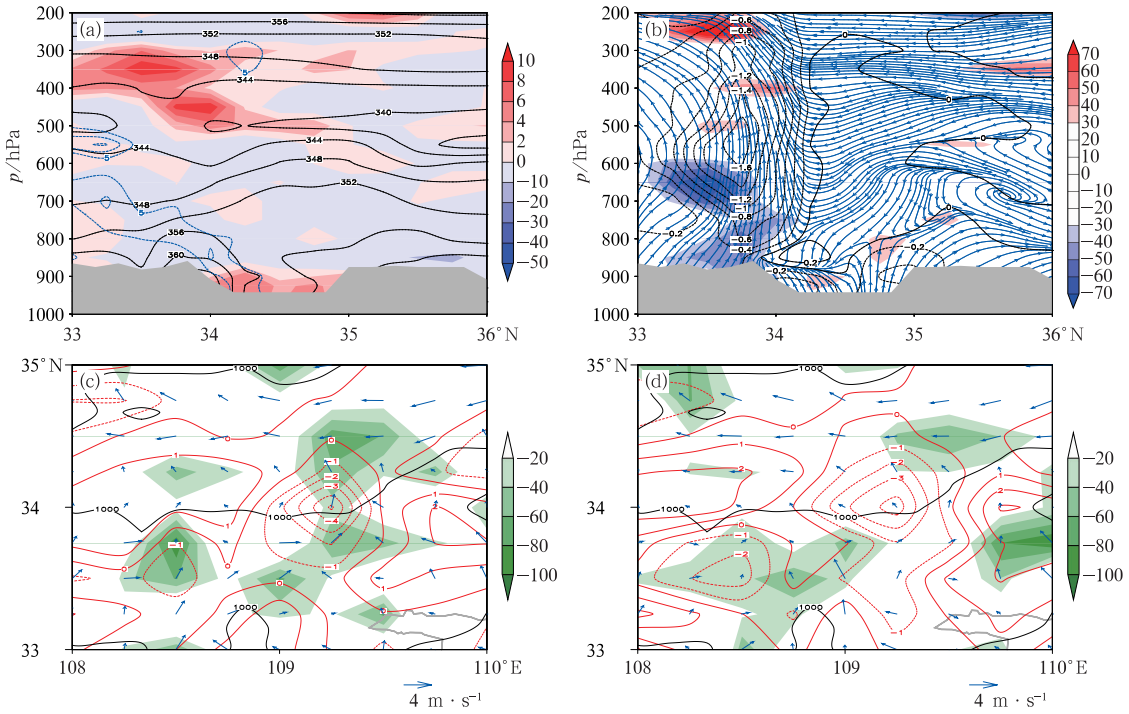
Fig. 5　(a, b) Vertical profile of (a) pseudo-equivalent potential temperature (black contour, unit: K), temperature advection (colored, unit: 10^{-5} K·s^{-1}), frontogenesis function (blue contour, unit: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}), (b) vertical velocity (contour, unit: Pa·s^{-1}), flow field (blue streamline for v and w, unit: m·s^{-1}), divergence (colored, unit: 10^{-6} s^{-1}) along 109°E at 12：00 BT; (c, d) distribution of surface wind (wind vector, unit: m·s^{-1}), divergence (colored, unit: 10^{-5} s^{-1}), perturbation temperature (red contour, unit: ℃) at (c) 14：20 BT and (d) 15：00 BT 26 July 2018

主(图 6b)，不利于雷暴移入后进一步发展。14：00(图 6c)雷暴下山后平原地区出现负的温度扰动，伴有较强偏南风出流，冷出流受阻于骊山(34.3°N、109.4°E，图 8b)山前，负的扰动温度原地停滞(图 6d)，表现出明显的地形辐合。阵风锋向西偏北方向移动，东南风出流和环境东风之间辐合较弱，不利于新的对流触发。

4.2　冷池与垂直风切变演变特征

环境场低层垂直风切变与冷池的相互作用，是雷暴增强的重要机制之一(陈双等，2011)。利用关中平原地区地面加密观测资料计算冷池前沿温度梯度代表冷池出流强度(高帆等，2022)，同时将 26℃等温线作为冷池边缘标识线(高帆等，2022；黄小彦等，2020)，计算其所围面积代表冷池范围，利用泾河站风廓线雷达估算 0～3 km 风矢量差，分析冷池与垂直风切变的演变特征，结合环境场及对流发展过程探讨其在风暴组织化中的作用。

26 日 12：00 后垂直风切变逐步增大(图 7d)，14：00(图 7a)雷暴单体大于 35 dBz 的面积增大，下沉气流加强造成冷池加强，自东向西存在 E、M、W 三个冷池中心，最低气温达到 22℃，西安南部冷池中心 M 变温幅度达到 −8℃·h^{-1}。冷池向平原地区快速下滑，西南风出流由 2 m·s^{-1} 增大至 8 m·s^{-1}，其与边界层偏东风辐合，有利于触发新的对流。该阶段冷池强度较弱，对流系统的发展依赖于有利

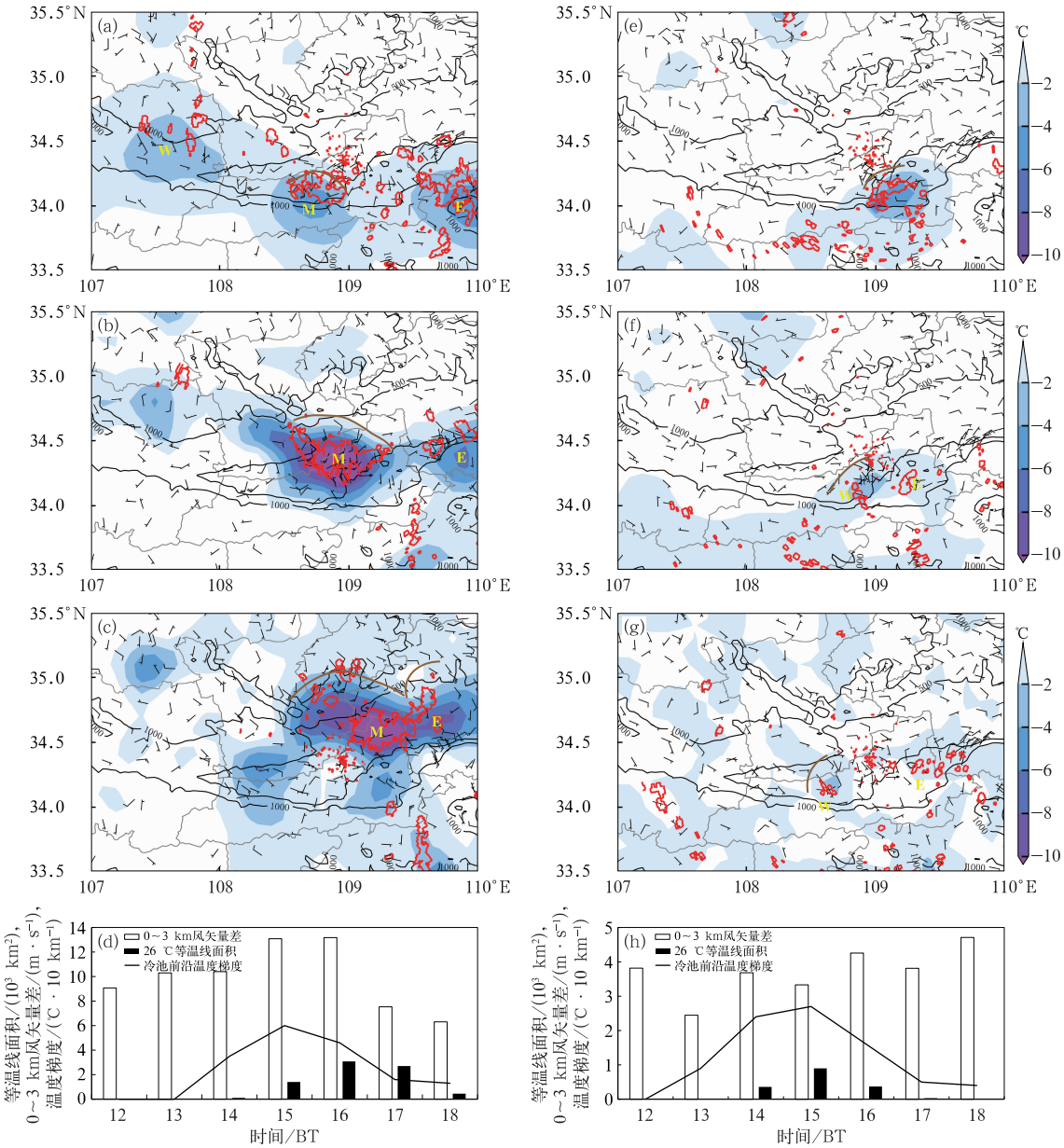


注：图 a，b 中灰色阴影为地形；图 c，d 中黑色等值线为 1000 m 地形线。

图 6 2018 年 7 月 29 日(a，b)12：00 沿 108.75°E 的(a)假相当位温(黑色等值线，单位：K)、温度平流(填色，单位：10^{-5} K·s^{-1})、锋生函数(蓝色等值线，单位：10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1})，(b)垂直速度(等值线，单位：Pa·s^{-1})、流场(v 和 w，蓝色流线，单位：m·s^{-1})、散度(填色，单位：10^{-6} s^{-1})的垂直剖面，及(c)14：00，(d)15：00 的地面风场(风矢)、散度(填色，单位：10^{-5} s^{-1})、扰动温度(红色等值线，单位：℃)

Fig. 6 (a, b) Vertical profile of (a) pseudo-equivalent potential temperature (black contour, unit: K), temperature advection (colored, unit: 10^{-5} K·s^{-1}), frontogenesis function (blue contour, unit: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1}), (b) vertical velocity (contour, unit: Pa·s^{-1}), flow field (blue streamline for v and w, unit: m·s^{-1}), divergence (colored, unit: 10^{-6} s^{-1}) along 108.75°E at 12:00 BT; (c, d) distribution of surface wind (wind vector, unit: m·s^{-1}), divergence (colored, unit: 10^{-5} s^{-1}), perturbation temperature (red contour, unit: ℃) at (c) 14:00 BT and (d) 15:00 BT 29 July 2018

的环境热力条件(陈明轩和王迎春，2012)。15：00(图 7b，7d)对流降水加强使冷空气快速下沉，冷池 M 范围和前沿温度梯度出现跳跃式增长，中心最低气温约为 23℃，前沿到达西安城区。由于前期环境气温高，1 小时降温超过 10℃，最强达到 16℃，0～3 km 风矢量差同步增长至 13 m·s^{-1}。阵风锋的移动方向与 0～3 km 风矢量差的配置符合 Wilson et al(1998)参照 RKW 理论建立的有利于对流发展的概念模型，新生对流的上升气流在中层西南风引导下向东北方向伸展，和低层单体移动方向一致，有利于上升运动发展，雷暴的组织化程度越来越高，形成强的下沉气流维持冷池强度。强冷池形成强的辐散出流，与环境暖湿大气形成的中尺度辐合进一步加强，发展强盛时又形成新的下沉气流，形成了“对流发展-冷池加强-对流发展”的正反馈机制(高帆等，2022)。16：00(图 7c)冷池 E 下山后与冷池 M 合并，使对流系统生命史进一步延长，冷池范围扩大，中心温度维持在 23℃。由于冷池前沿位置是前期高温中心(达到 40℃)，移动前方气温在 33～35℃，导致冷池前沿温度梯度较 15：00 有所下降，风矢量差仍维持在 13 m·s^{-1}左右，对流继续发展，关中东北部出现大风天气。之后风切变减小，受冷池中心温度逐渐升高及日落环境气温下降影响，冷池前沿温度梯度显著下降，随着阵风锋逐渐远离，风暴结构开始松散。可见，7·26 过程尽管初期环境垂直风切变较弱，但随着对流系统合并发展加强，垂



注:图 a～c,e～g 中,黑色实线为 500 m 和 1000 m 地形线,棕色弧线为阵风锋位置,字母 E、M、W 标记冷池中心。

图 7　2018 年 7 月(a～c)26 日 14:00—16:00,(e～g)29 日 14:00—16:00 的逐小时负变温(填色)、2 分钟平均风速(风羽)、≥35 dBz 雷达回波(红色等值线);(d)26 日 12:00—18:00,(h)29 日 12:00—18:00 26℃等温线所围面积、0～3 km 风矢量差、冷池前沿温度梯度逐小时演变

Fig. 7　Hourly negative temperature change (colored), 2 min average wind speed (barb), radar echo ≥35 dBz (red contour) in (a−c) 14:00−16:00 BT 26 and (e−g) 14:00−16:00 BT 29 July 2018, and hourly evolution of area surrounded by the 26℃ isotherm, 0−3 km wind vector difference, temperature gradient in front of the cold pool in (d) 12:00−18:00 BT 26 and (h) 12:00−18:00 BT 29 July 2018

直风切变同步增强,在阵风锋移动方向和 0～3 km 风矢量差有利的配置下,对流发展和冷池加强形成了正反馈机制。

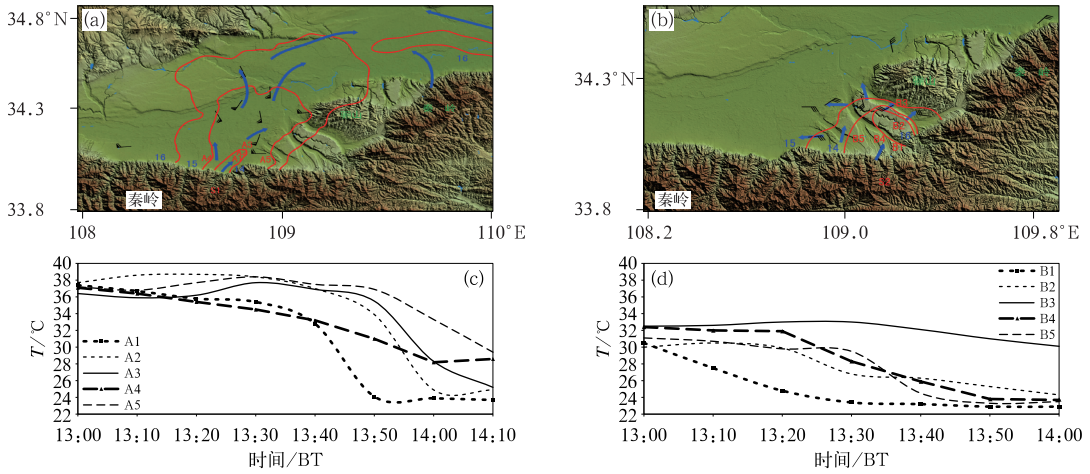
7 月 29 日 14:00(图 7e)雷暴下山后强回波位于黄土台塬地区,冷池范围扩大,中心最低温度为 24℃,负变温增强至 4～6℃·h^{-1},偏南风出流和环

境场偏东风之间形成中尺度辐合线，阵风锋显现。15:00(图 7f)对流系统分裂为 W、E 两部分，冷池 E 强度减弱，W 中心最低温度约为 24℃，强度维持，并继续向西移动，其前部存在东南风和偏东风形成的弱辐合(图 7g)，阵风锋由向西北移动逐渐转为向西移动，在秦岭北麓局地仍有较强的孤立雷暴触发(图 4h)。7 月 29 日 15:00，关中平原引导气流为 2～4 m·s^{-1}的偏东风(图略)，阵风锋向偏西方向移动，和关中平原边界层风向接近，难以形成强的辐合抬升，对流发展高度一般在 5 km 以下，且移动前方关中西部气温低于东部(图略)，不利于强的温度梯度形成。弱的环境风场条件下，雷暴移动缓慢，阵风锋切断上升气流后母体雷暴逐渐减弱，新触发的单体，其范围、强度进一步变小，对流天气均以孤立雷暴形式发生。对流发展过程中，0～3 km 风矢量差始终小于 5 m·s^{-1}(图 7h)，不利于风暴的维持和加强，没有形成有组织化的对流系统。对比可见，7·29 过程冷池强度和范围均比 7·26 过程弱，阵风锋移动方向和边界层风向接近，前方辐合弱，仅在秦岭沿山有新生对流触发，冷池和低层垂直风切变没有建立同步增长机制，对流天气强度远不及 7·26 过程。

4.3 地形作用

研究表明，当特殊地形对冷池的移动产生影响时，对流系统结构、传播也将发生变化(张家国等，2015；韦惠红等，2022；章翠红等，2018；徐姝等，2019)。

7 月 26 日初始冷池位于西安西南部 S1 处(图 8a)，该处地势陡峭，西南高，东北低。A1～A5 依次代表东大街办、五星街办、兴隆街、余下镇、子午街站，其中：A1、A4、A5 为最靠近冷池前沿同一纬度的三个站点，A1、A2、A3 三个站沿平原南边界自西南向东北分布。13:00 S1 处开始明显降温，五个站气温均在 37℃左右(图 8c)，14:00 冷池密度流沿 S1 处山谷侵入平原，西南风出流达到 15.6 m·s^{-1}，冷池前沿呈东北—西南狭窄带状沿地形边界向东北侵入，面积为 100 km^2。A1、A2、A3 相继出现剧烈降温，与 A1 同一纬度的 A4、A5，降温幅度却较小，A5 由于海拔高，13:50 前基本未受影响，冷空气倾泻而下后才出现相对明显降温。随着势能转为动能，14:00—15:00 冷池以 50 km·h^{-1}的速度向前推进，与骊山山前对流合并(图 8a，图 4b)，随后在平原地形开阔处出流的偏南分量增加，向北移动与西北部对流云团合并(图 7a，7b)，15:00—16:00 受北山地形限制，出流的偏西风增强，向东北方向移动，同时秦岭东段雷暴下山形成东南风出流(图 8a)，两者在关中平原东北部汇合，风暴加强(图略)。可见，冷池出流极大风风向与地形有密切关系，风暴最终



注：图 a，b 中，蓝色箭头代表冷出流方向；风羽为 15:00 极大风；字母 S1，S2，A1～A5，B1～B5 标记相关站点。

图 8 2018 年 7 月(a)26 日 14:00—16:00，(b)29 日 14:00—16:00 地面 26℃温度线演变(红色等值线)，及(c)26 日 13:00—14:10，(d)29 日 13:00—14:00 逐 10 分钟温度演变

Fig. 8 (a, b) The schematic diagrm of 26℃ isotherm (red contour) in (a) 14:00－16:00 BT 26 and (b) 14:00－16:00 BT 29 July, and (c, d) 10 min temperature evolution in (c) 13:00－14:10 BT 26 and (d) 13:00－14:00 BT 29 July 2018

在关中平原内部自西南向东北移动。

7 月 29 日初始冷池位于西安东南部 S2 处(图 8b),雷暴下山后位于 500～1000 m 黄土台塬区,该处东南高,西北低,遍布西北—东南向的沟壑。B1～B5 依次代表汤峪、前卫、曳湖、史家寨、引镇大峪站,其中:B1、B2、B3 为冷池前方东北—西南向分布的站点,B1、B4、B5 为西北—东南向站点。冷池下山首先影响 B1,13:00 风向由 2～4 m·s^{-1}偏北风转为 10 m·s^{-1}西南风,10 分钟气温下降 3℃(图 8d)。13:29 西南风出流(与秦岭山谷走向一致)达13.8 m·s^{-1},方向近乎垂直于沟壑走向,冷池密度流的重力作用使其易于向西北方向前进,出流的动力作用使其向东北移动,导致冷池扩散前进。B2、B4 几乎同时开始降温,东北路径 B2、B3 海拔高度有所升高,西北路径 B4、B5 具有明显的地形梯度,B5 气温下降明显幅度明显大于 B3(图 8d)。14:00(图 8b)冷池面积为 360 km^2,势力被分散,加之地形摩擦作用,出流速度进一步减弱,14:00—15:00 出流边界移速为 30 km·h^{-1}。15:00 西南风、东南风出流背向而行,使得对流系统分裂为东西两部分(图 7f),冷池强度不断减弱。

综合以上分析可见(图 9),7·26 过程发生在副高西北部,环境场上升运动有利于对流移入后发展,阵风锋移动方向和 0～3 km 风矢量差的配置符合 Wilson et al(1998)参照 RKW 理论建立的概念模型。7·29 过程发生在副高南侧,环境场下沉运动对对流进一步发展不利,且阵风锋移动方向和边界层风向接近,移动前方辐合弱,垂直风切变弱,不利于对流触发及进一步组织化发展。在冷池形成初期,地形影响了冷池的移动方式,进而改变了其强度,对后期对流发展产生影响:7 月 26 日秦岭山区冷池形成后沿峡谷快速下滑,强的西南风出流使冷池沿平原南边界快速向东北推进,冷池势力集中,移速快,强的辐合抬升触发新对流强烈发展,形成正反馈机制;7 月 29 日冷池下山后位于黄土台塬地形过渡区,冷池扩散传播,使其势力减弱,出流风速逐渐减小,加之温度梯度小,难以形成强的辐合(触发对流)。

5　结论及讨论

(1)7·26 过程雷达回波初始高度高,具有悬垂结构,冷池小时最大变温达 16℃,雷暴组织化程度高、生命史长、冷池范围和强度显著强于 7·29 过程,产生大范围短时强降水和雷暴大风;而 7·29 过程以孤立普通单体的生消为主,冷池小时最大变温为 8℃,仅造成秦岭沿山地区局地短时强降水。

(2)7·26 过程发生在副高西北侧,中低层的暖平流发展使不稳定能量增长;7·29 过程发生在副高南侧,低层相对湿度大,不利于地面辐射增温,午后气温低于 7·26 过程,冷池和环境大气的温度梯度也较小。两次过程均具备产生对流的基本条件,7·26 过程能量和垂直风切变比 7·29 过程强,产生雷暴大风的潜势更高。两次过程对流发生前 0～3 km 风矢量差较小(不足 8 m·s^{-1}),但 7·26 过程对流发展过程中垂直风切变逐步增大。

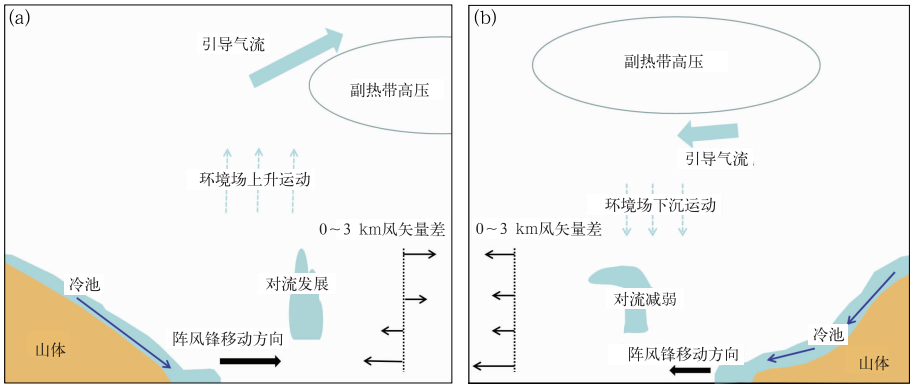


图 9　2018 年 7 月(a)26 日,(b)29 日秦岭北麓下山雷暴发展概念模型

Fig. 9　Conceptual model of down-to-hill thunderstorm development at the northern foot of Qinling Mountains on (a) 26 and (b) 29 July 2018

(3)阵风锋移动方向与0～3 km风矢量差的配置影响对流发展。7·26过程阵风锋移动方向与边界层风向相反,又与风暴承载层平均风向相同,有利于对流垂直发展;关中地区一致的上升运动及北部山前地形抬升,为雷暴移入后发展加强提供了有利的动力条件;对流发展过程中,低层垂直风切变逐步增大,与冷池强度保持同步增长,冷池增强和对流发展形成了正反馈机制。7·29过程阵风锋移动方向和边界层风向相同,低层辐合弱,且关中地区以下沉气流为主,垂直风切变始终较小,不利于对流组织化发展。

(4)不同地形地貌对冷池的移动方向及强度产生了影响。7月26日强的西南出流使冷池呈东北—西南狭长带状,沿平原南边界向东北推进,冷池势力集中,移速快,强的辐合触发新对流发展。7月29日冷池在黄土台塬地形过渡区扩散传播,东南风和西南风出流使对流分裂,冷池强度不断减弱,温度梯度减小,不利于新对流触发。

文章针对秦岭北麓间隔两天发生的伴有明显阵风锋的雷暴下山过程进行对比分析,结果显示,有利于雷暴发展加强的要素包括:具有中等以上有效位能,平原地区以上升运动为主,850 hPa比湿大于12 g·kg^{-1};700 hPa附近存在相对干层时有利于大风天气形成;对流发展过程中低层垂直风切变逐步增大(0～3 km风矢量差达到12 m·s^{-1}以上),与冷池强度保持同步增长;阵风锋移动方向与边界层风向相反,又与风暴承载层平均风向相同,有利于对流垂直发展。后期还需开展大量个例的分析,以提高结论的普适性。

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飑线过程发展维持的数值模拟[J].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[J]. Acta Meteor Sin,70(3):371-386(in Chinese).

陈明轩,肖现,高峰,2017.出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J].大气科学,41(5):897-917. Chen M X,Xiao X,Gao F,2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chin J Atmos Sci,41(5):897-917(in Chinese).

陈双,王迎春,张文龙,等,2011.复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J].气象,37(7):802-813. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, et al, 2011. Intensifying mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing Area[J]. Meteor Mon,37(7):802-813(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[J].气象,49(6):641-656. Cheng W J, Yu X D, Wang X M, et al, 2023. Climatic characteristics of the convective storms moving from the Taihang Mountains to the North China Plain[J]. Meteor Mon. 49(6):641-656(in Chinese).

崔新艳,陈明轩,秦睿,等,2021.对流初生机理的研究进展[J].气象,47(11):1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2021. Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon,47(11):1297-1318(in Chinese).

高帆,俞小鼎,尹承美,等,2022.山东一次浅薄冷空气触发强降水过程的对流系统组织形态演变分析[J].气象,48(8):993-1006. Gao F, Yu X D, Yin C M, et al, 2022. Analysis on the evolution of convective system organization in a process of severe precipitation triggered by shallow cold air in Shandong[J]. Meteor Mon,48(8):993-1006(in Chinese).

关晓军,覃靖,2019.福建省一次强飑线过程的强度和移动特征分析[J].干旱气象,37(5):799-808. Guan X J, Qin J, 2019. Motion and intensity characteristics of a strong squall line process affecting Fujian Province[J]. J Arid Meteor, 37(5):799-808(in Chinese).

胡文东,杨侃,文小航,等,2021.阵风锋差异及强迫作用对雷暴触发影响的模拟分析[J].高原气象,40(4):773-788. Hu W D, Yang K, Wen X H, et al, 2021. Stimulation analysis on differences and force effects of gust fronts in a severe convection trigging process[J]. Plateau Meteor, 40(4):773-788(in Chinese).

黄小彦,孙继松,刘文婷,2020.地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J].气象学报,78(4):551-567. Huang X Y, Sun J S, Liu W T, 2020. The interaction between low-level jet evolution and severe convective rainstorms under topographic effect[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):551-567(in Chinese).

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]. Chin J Atmos Sci, 45(2):287-299(in Chinese).

刘勇,王楠,刘黎平,2007.陕西两次阵风锋的多普勒雷达和自动气象站资料分析[J].高原气象,26(2):380-387. Liu Y, Wang N, Liu L P, 2007. Analyses of two gust-fronts using doppler radar and automatic meteorological station data[J]. Plateau Meteor, 26(2):380-387(in Chinese).

彭霞云,章丽娜,刘汉华,等,2022.冷涡底部对流引起的杭州湾极端大风形成机制分析[J].气象,48(6):719-728. Peng X Y, Zhang L N, Liu H H, et al, 2022. Formation mechanism of extreme winds in Hangzhou Bay caused by convection at the bottom of cold vortex[J]. Meteor Mon, 48(6):719-728(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[J].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[J]. Meteor Mon,49(1):1-11(in Chinese).

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[J]. 气象，38(2)：164-173. Sun J S，Tao Z Y，2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon，38(2)：164-173(in Chinese).

孙靖，程光光，2017. 北京城区热动力条件对雷暴下山后强度的影响[J]. 高原气象，36(1)：207-218. Sun J，Cheng G G，2017. Influence of thermal and dynamical conditions over Beijing City Area on strength of down-to-hill thunderstorms[J]. Plateau Meteor，36(1)：207-218(in Chinese).

万夫敬，孙继松，孙敏，等，2021. 山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J]. 气象学报，79(5)：717-731. Wan F J，Sun J S，Sun M，et al，2021. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line[J]. Acta Meteor Sin，79(5)：717-731(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水分析[J]. 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[J]. Meteor Mon，43(4)：425-433(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[J]. 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[J]. 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[J]. 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[J]. Torrent Rain Dis，41(3)：241-253(in Chinese).

武麦凤，吉庆，武维刚，2017. 一次槽前“干”对流背景下阵风锋天气过程分析[J]. 高原气象，36(3)：845-851. Wu M F，Ji Q，Wu W G，2017. A mesoscale analysis of a gust front weather process caused by fore-trough dry convection[J]. Plateau Meteor，36(3)：845-851(in Chinese).

徐姝，东高红，熊明明，2019. 冷池对引发新乡“7·9”特大暴雨的中尺度对流系统的影响分析[J]. 气象，45(10)：1426-1438. Xu S，Dong G H，Xiong M M，2019. Impact of cold pool on mesoscale convective system for extreme rainfall over Xinxiang on 9 July 2016[J]. Meteor Mon，45(10)：1426-1438(in Chinese).

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：416. Yu X D，Wang X M，Li W L，et al，2020. Thunderstorm and Severe Convection Approach Forecast[M]. Beijing：China Meteorological Press：416(in Chinese).

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 Meteor Sin，70(3)：311-337(in Chinese).

章翠红，夏茹娣，王咏青，2018. 地形、冷池出流和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. 大气科学学报，41(2)：207-219. Zhang C H，Xia R D，Wang Y Q，2018. Observational analysis of a local heavy rainfall in Beijing caused by terrain，cold pool outflow and warm moist air interactions[J]. Trans Atmos Sci，41(2)：207-219(in Chinese).

张家国，周金莲，谌伟，等，2015. 大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J]. 气象学报，73(2)：291-304. Zhang J G，Zhou J L，Chen W，et al，2015. The structure and propagation characteristics of the extreme-rain-producing MCS on the west side of Dabie Mountain[J]. Acta Meteor Sin，73(2)：291-304(in Chinese).

张文龙，崔晓鹏，黄荣，2014. 复杂地形下北京雷暴新生地点变化的加密观测研究[J]. 大气科学，38(5)：825-837. Zhang W L，Cui X P，Huang R，2014. Intensive observational study on evolution of formation location of thunderstorms in Beijing under complex topographical conditions[J]. Chin J Atmos Sci，38(5)：825-837(in Chinese).

赵强，陈小婷，王楠，等，2022. 副热带高压影响下陕西关中强对流发生的环境场特征及触发机制[J]. 气象，48(1)：28-43. Zhao Q，Chen X T，Wang N，et al，2022. Environmental characteristics and trigger mechanism of severe convection under the influence of subtropical high in Guanzhong Area of Shaanxi Province[J]. Meteor Mon，48(1)：28-43(in Chinese).

郑丽娜，刁秀广，2016. 一次华北飑线的阵风锋天气过程分析[J]. 气象，42(2)：174-182. Zheng L N，Diao X G，2016. Analysis on a gust front of squall line event in North China[J]. Meteor Mon，42(2)：174-182(in Chinese).

Rotunno R，Klemp J B，Weisman M L，1988. A theory for strong，long-lived squall lines[J]. J Atmos Sci，45(3)：463-485.

Wilson J W，Crook N A，Mueller C K，et al，1998. Nowcasting thunderstorms：a status report[J]. Bull Am Meteor Soc，79(10)：2079-2100.

（本文责编：戴洋）