

刘嘉慧敏,郑然,梁绵,等. 2018年陕西商洛一次罕见强雹暴环境条件及雷达特征分析[J]. 陕西气象,2020(2):1-11.

文章编号:1006-4354(2020)02-0001-11

2018年陕西商洛一次罕见强雹暴环境条件及雷达特征分析

刘嘉慧敏¹,郑 然²,梁 绵¹,张煦庭¹,娄盼星³

(1. 陕西省气象台,西安 710014;2. 四川省气候中心,成都 610072;

3. 陕西省气象科学研究所,西安 710014)

摘 要:利用商洛天气雷达资料和相关实况资料,对2018年5月15日午后商南地区一次强雹暴天气的环境条件和雷达回波结构演变特征进行了详细分析。结果表明:(1)雹暴发生在低层气旋暖区,中层有冷温槽发展东移,高层有急流的背景下,0℃层高度为4.3 km,-20℃层高度为7.5 km。地面中尺度辐合线触发的对流云团在不稳定层结和较强垂直风切变作用下发展为超级单体风暴。(2)强雹暴的低层反射率因子呈现出明显的钩状回波或倒“V”型入流缺口,并伴有三体散射长钉等特征。回波顶高度达11 km左右,最大VIL值达77 kg/m²。反射率因子垂直剖面呈现出典型的有界弱回波区、回波悬垂和回波墙。最大的回波强度出现在沿着回波墙的一个竖直的狭长区域,中心值达到65 dBz以上。相应的中低层径向速度图存在明显辐合区,有利于强上升气流发展。(3)此次强雹暴天气在西北东部较为罕见,前人总结的冰雹各项潜势预报指标具有一定局限性,垂直液态积分水含量密度(VIL密度)跃增能更好地提前指示大冰雹。因而可用VIL密度值明显跃增至5.5 g/m³提前24 min预警大冰雹,进一步补充和完善陕西极端突发强天气预警指标。

关键词:不稳定层结;强雹暴;VIL密度

中图分类号:P458.121.2

文献标识码:A

冰雹因其具有局地性、突发性和强烈性等特征,常常给农业生产和人民生命财产造成严重危害,一直以来都备受国内外研究人员的关注。充足水汽、不稳定层结、抬升机制和合适的0℃层高度等是雹暴发生发展需要满足的基本条件^[1]。同时,天气尺度和中小尺度等系统对雹暴有综合影响,其中天气尺度系统对其发展有直接制约和影响作用^[2],故雹暴往往是在一些有利天气尺度背景条件下发生发展起来的^[3-4]。

随着地面加密气象观测网的建设,新一代天气雷达成为冰雹等强对流天气最主要的探测手段^[5-7]。郑媛媛等^[8]和俞小鼎等^[9]分别对一次雷

暴大风伴随冰雹的经典超级单体风暴雷达观测特征和一次伴随极强龙卷的强降水超级单体风暴进行了全面深入分析。肖艳姣等^[10]在研究一次切变线暴雨中尺度系统的多普勒雷达资料时发现低层切变线上的扰动与地面降水加强关系密切,切变线上的中尺度辐合线附近往往有中尺度回波形成,是造成暴雨的主要系统。朱君鉴等^[11]分析出新一代天气雷达的冰雹指数、中气旋、垂直积分液态含水量(VIL)等产品及多普勒特征对冰雹有较好的识别和预报能力。前人研究表明当有强雹暴发生时,雷达反射率回波会伴有钩状回波、有界弱回波区、悬垂回波结构和三体散射特征等^[12-13]。

收稿日期:2019-11-01

作者简介:刘嘉慧敏(1989—),女,陕西宝鸡人,硕士,工程师,主要从事灾害性天气预报技术研究。

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-130)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-101)、高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金(2018-青年-05)资助

大量气象学者通过收集多年降雹资料和相应的雷达探测资料,建立了超级单体的流场概念模型和中气旋模型,总结得出许多本地化预警指标^[14-15]。这都为冰雹等灾害性天气监测和预警发挥了重要作用。另外,由于具有对强天气的识别跟踪功能,近年来多普勒天气雷达提供的 VIL 产品被广泛应用。上世纪 80 年代末,VIL 就应用在美国的 WSR-88D 多普勒雷达中,成为有效判别降水及其降水潜力、强对流天气造成的暴雨、暴雪和冰雹等灾害性天气使用率较高的工具之一^[16]。根据美国 400 多个冰雹事件统计发现,冰雹直径随着 VIL 值增大而增大,VIL 在 45 kg/m^2 以上的风暴一般可产生 1.9 cm 以上的冰雹, 55 kg/m^2 以上的一般可产生 3 cm 以上的冰雹^[17],因此一旦临界值被确定,可用于判别带有大冰雹的风暴。在国内,众多气象学者将 VIL 值的跃增作为雹暴天气的预警指标。付双喜等^[18-19]把 VIL 作为判别冰雹的工具之一,在甘肃人工防雹作业中进行了应用。王伟等^[20]运用 VIL 对天津地区的强对流天气过程进行了分析总结,并利用多元回归的方法建立了预报方程。李薇等^[21]提出了 VIL 分层,并对各种天气上下层的 VIL 分布进行了分析,这些研究在实际应用中均取得了不错的效果。

西北地区是我国冰雹的多发区,据近 41 a 的资料统计表明,西北地区的平均冰雹日数在 0~20 d 之间^[22]。特别是在 1970—2015 年期间,西北地区和青藏高原地区区域平均单次降雹持续时间均呈现显著的上升趋势^[23],这无疑给强对流预报带来了巨大挑战。王若升等^[24]研究指出在干旱半干旱地区,“溃变理论”和 V-30 图预报工具对冰雹天气具有一定的预报能力,可作为短期预报一个可靠的参考工具,但冰雹的临近预报预警仍然是强对流业务中面临的重要难点和挑战之一。另外,西北地区地势复杂,对于不同海拔,冰雹在环境方面的特征及其差异大小、演变机制仍然不甚清楚,以上这些均是迫切需要解决的问题。

2018 年 5 月 15 日下午,陕西商洛市商南县遭受强对流风暴的袭击。强对流开始于 14 时左右,商南县持续 40 min 左右强降水。14:40—14:55,城区突降特大冰雹,降雹量大,观测到的冰

雹直径最大为 55 mm,达近十年之最,实属罕见,部分站点还出现短时强降水和雷暴大风。受强对流天气影响,据初步统计,有 5 700 多户群众不同程度受灾,灾害造成经济作物受灾面积 610 hm^2 ,商南直接经济损失达数千万元。此次强烈雹暴天气出现在距离商洛雷达东南侧约 100 km。本文通过分析此次强雹暴的发生发展演变特征,研究其产生的环境条件和雷达特征参数变化,以期提高陕西强冰雹天气临近预报预警能力。

1 资料和方法

本文使用的资料:(1)2018 年 5 月 15 日地面、高空常规气象观测资料,加密观测资料;(2)NCEP/NCAR 逐日 4 次 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL 全球再分析资料;(3)商洛新一代多普勒天气雷达产品。基于天气学分析、物理量诊断和时滞相关分析方法,以期总结预报着眼点,为此类特殊强对流天气的预报提供参考。

2 天气背景及环境条件分析

2.1 环流形势

此次强雹暴天气是在大、中尺度天气系统和中、高纬环流相互作用的背景下产生的。强雹暴发生前,15 日 08 时,200 hPa(图略)上商洛处于急流出口区左侧,具备有利于强对流发生发展的高空辐散条件。500 hPa(图 1a)河套东部有一宽广的低槽,在陕西中部形成低涡,对应 -8°C 冷中心,陕西商洛处于低涡底部前部西南气流中。700 hPa(图略)商洛处于低空急流左前方,增强低层动力抬升,同时暖湿水汽不断向这里输送,商南温度露点差小于 3°C ,空气接近饱和。850 hPa(图略)上商洛为 24 h 正变温区,正好对应 500 hPa 上 24 h 负变温区,850 hPa 与 500 hPa 温差达 27°C ,温度直减率较大,冷平流叠加在暖平流之上,形成了上干冷、下暖湿的不稳定层结。同时,850 hPa 商洛存在显著湿区,商南比湿达到 12 g/kg 。

午后 14 时(图 1b),500 hPa 河套低涡仍然维持,商南处于低涡底部,不断受到其底部弱冷空气扰动影响,有利于加大大气不稳定性。地面图上(图 1c),陕西大部处于内蒙东部气旋南侧暖区中,商洛上空并未有明显的天气尺度辐合抬升。地面升温明显,14 时商南站的气温已升至 31°C

(图 1d),表明不稳定能量在不断积累,低层强烈

加热和高空干冷大气使得上空不稳定层结加剧。

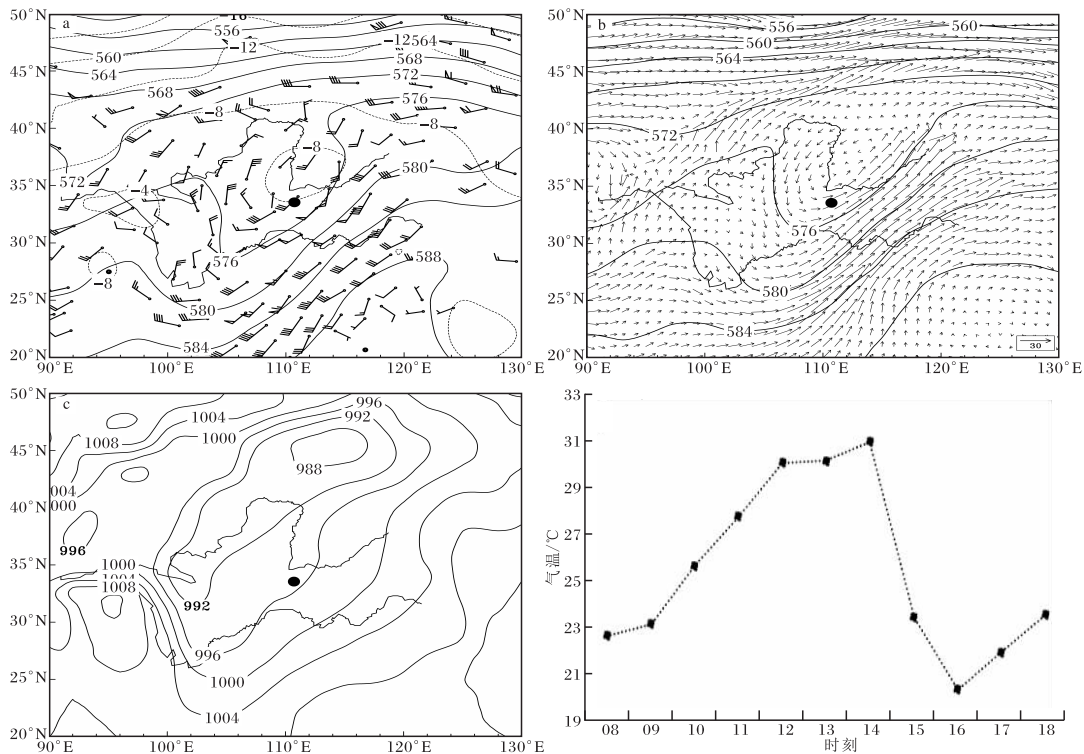


图 1 2018-05-15 500 hPa 形势场(实线为等高线,单位为 dagpm;虚线为等温线,单位为 °C;a 08 时,b 14 时)、海平面气压场(c 14 时,单位为 hPa)和商南站气温逐时演变(d)(黑色实心圆为商南位置)

2.2 环境条件

2.2.1 不稳定条件

大气稳定度和热力条件对雷暴能否发展有着十分重要的作用。由于商洛站没有探空资料,选取 08 时距其最近的卢氏站(商南东北侧,距离商南站约 100 km)探空资料(图 2a)可见,近地面存在逆温,有利于进一步加聚不稳定能量的积累。从风暴各项对流参数来看,08 时 K 指数、SI 指数已分别达到 41 °C 和 -5.48 °C, ($K > 32$ °C, SI 指数在 -4 ~ 0 °C 之间),850 hPa 与 500 hPa 假相当位温差为 -17.07 °C,均指示大气具有较强的不稳定性。CAPE 值为 378 J/kg,虽然强度不大,但根据实况午后商洛站气温升高至 31.6 °C,将其对 08 时探空资料进行订正后,CAPE 骤增至 2 626.4 J/kg。同时从 14 时 850 hPa 与 500 hPa 温度差分布(图 2b)可见,商南地区二者温差可达 30 °C 以上,说明白天的热力不稳定性显著增大,有利于对流发展。反映动力条件的最大上升速度达到 28 m/s,强烈持久的上升气流对产生冰雹非常有利。前人研究指出,发展旺盛的

雹暴多出现在中等到强的垂直风切变环境下,08 时卢氏站 0 ~ 6 km 垂直风切变强度为 14 s^{-1} ,为中等强度,且 700 ~ 300 hPa 风向几乎一致,有利于积雨云的上升气流和下沉气流变成有组织的两股对峙的倾斜上升气流和下沉气流,形成持久的组织化风暴。另外,强冰雹的产生还需要有合适的 0 °C 层和 -20 °C 层高度。08 时 0 °C 层高度为 4.3 km, -20 °C 层高度为 7.5 km,这也为冰雹的生长提供了非常有利的环境条件。

2.2.2 水汽和动力条件

水汽是强对流天气发生发展的重要条件。从 850 hPa 水汽通量及其散度场(图 3)上可以看出,强雹暴发生前,08 时(图 3a)水汽主要是从孟加拉湾经云贵高原向江淮地区输送,商洛大部水汽通量散度辐合不强。到了 14 时(图 3b),水汽通道偏北分量增强,商洛水汽通量辐合强度迅速增大,辐合中心值达 $-3 \times 10^{-5} g/(cm^2 \cdot hPa \cdot s)$ 以上,水汽条件较 08 时明显转好。

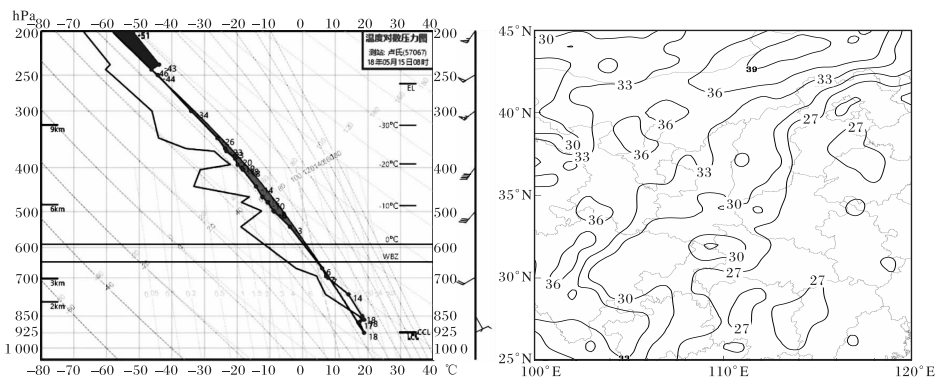


图2 2018-05-15T08 卢氏站探空图(a)、2018-05-15T14 850 hPa 与 500 hPa 温度差(b,单位为 $^{\circ}\text{C}$)

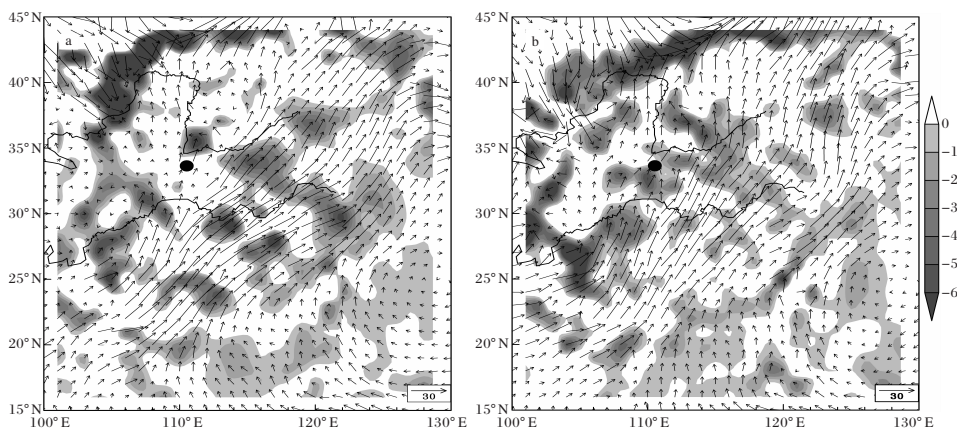


图3 2018-05-15 850 hPa 水汽通量(箭头,单位为 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$;

阴影为散度,单位为 $10^{-5} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$;黑色实心圆为商南位置;a 08 时,b 14 时)

从强雹暴区(33.4°N)垂直速度的高度-经度垂直剖面(图4)可以看出,14 时强雹暴发生区上空几乎整层为一致上升运动(除 500 hPa 附近呈弱下沉运动),最大上升运动区在 700~600 hPa 之间,垂直上升速度可达 -40 Pa/s 以上,强雹暴发生前动力条件非常好。同时,注意到在近地面层也存在很强的上升运动,这对强雹暴的触发提供非常有利的条件。

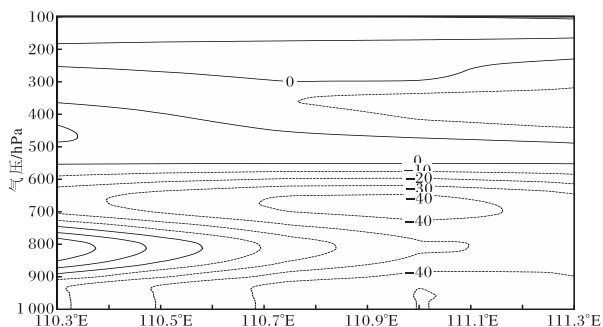


图4 2018-05-15T14 垂直速度沿纬向剖面 33.4°N 剖面(单位为 Pa/s)

2.3 近地面层触发条件

以上分析表明商南上空热力条件和不稳定条件较好,具有很好的对流发生发展的环境和产生冰雹的潜势,而强对流的发生发展需要外强迫触发。从地面加密资料(图5a)分析来看,在强冰雹发生前,午后太阳直射山区增温明显,14 时商南地区大部地面气温迅速升至 30°C 以上,由于海拔相对周边较高,植被较少,太阳辐射强,商南中部气温达到最大,中心值达 32°C 以上。从商南站 08—14 时 24 h 变温演变(图5b)来看,由于夜间辐射冷却作用,商南上空大气出现明显逆温,08 时商南站相较前一日 08 时气温偏高 5°C 。此后随着太阳辐射加强,逆温逐渐减弱消失,但商南站 24 h 变温仍呈正值,特别是在 13—14 时 24 h 变温存在小幅度回升,表明雷暴发生前局地增温显著,这将加速不稳定能量积累。

结合商南地区 12—14 时逐小时风场(图6a—c)和 08—14 时商南站 3 h 变压演变(图6d)来

看,09 时商南站 3 h 变压呈弱上升,之后显著下降。在 12 时商南中部就存在一条地面辐合线,随着 3 h 变压不断下降,13 时商南中部的地面辐合线仍稳定维持。到了 14 时,商南站 3 h 变压降至最低,达 -1.8 hPa,辐合线两侧 1 h 风速也明显加强,气流辐合强度加大,因而在该地面辐合线辐

合最强的青油河一带触发了对流风暴 A 生成,配合高空引导气流沿辐合线东移,并迅速加强发展为超级单体。该地面中尺度辐合线较强对流发生前 2 h 左右就已存在,之后两侧风速加强,气流辐合强度加强,从而触发了对流不稳定能量的释放,产生强对流。

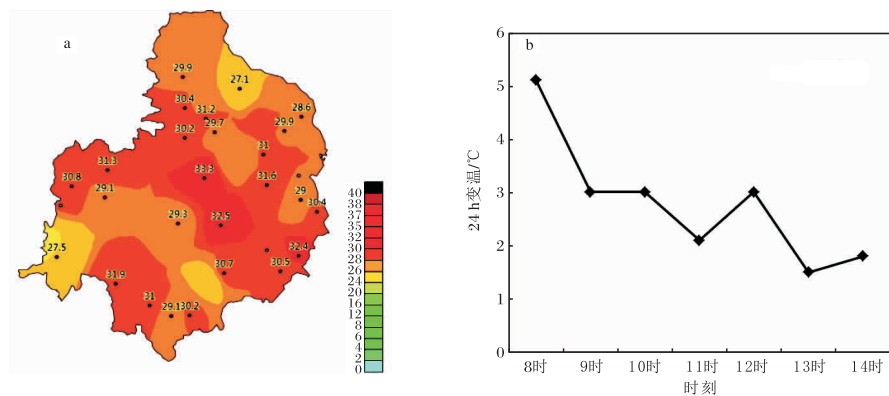


图5 2018-05-15T14 时商南地区气温(a,单位为℃)、
08—14 时商南站 24 h 变温演变(b)

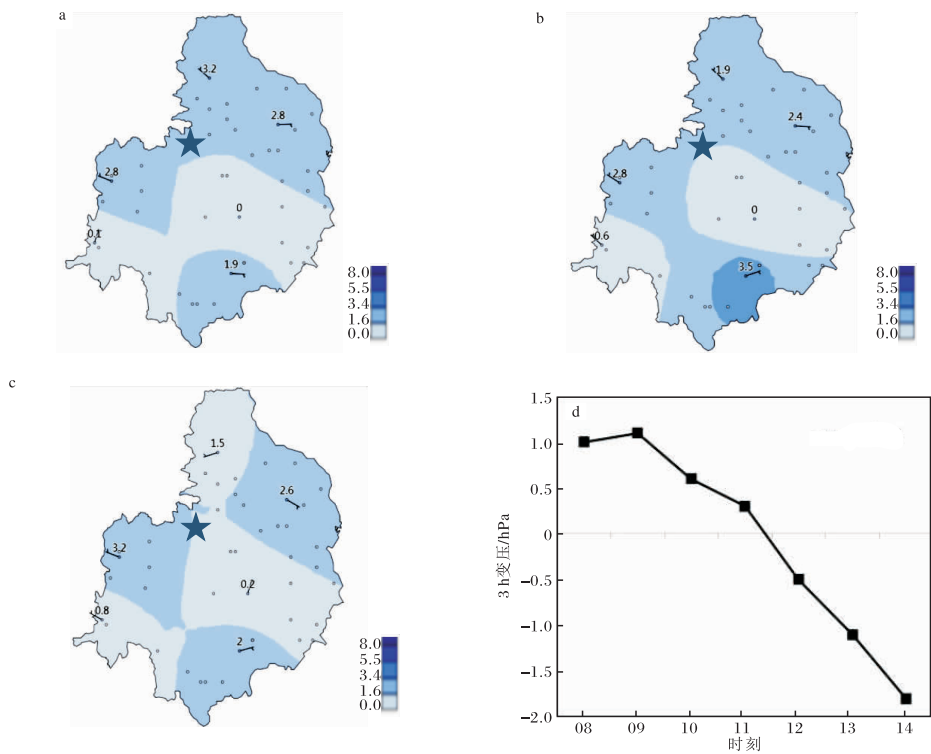


图6 2018-05-15 商南地区 12 时(a)、13 时(b)、14 时(c) 风场分布
(单位:m/s,五角星为风暴 A 初生地)、08—14 时商南站 3 h 变压演变(d)

3 地形作用

强风暴的形成与发展 and 局地地形有重要关系。商南境内地势西南部和北部较高,中东部较

低,呈掌状扇形向东南方倾斜的“喇叭口”地形,偏南暖湿气流所带来的水汽和热量在西部迎风坡堆积,导致其上空对流不稳定性增强,中尺度辐合线

附近出现小尺度扰动。陈双等^[25]进行复杂地形条件下雷暴下山增强机制研究表明,由于地形抬高了冷池出流高度,冷池出流叠加在低层暖空气之上使对流不稳定增强,同时冷池出流形成的负涡度与低层切变产生的正涡度达到近似平衡状态,有利于雷暴的下山增强。这在图 7 得以验证,风暴 A 在清油河一带生成(如图 7a),该处地势海

拔相较四周高,之后风暴 A 沿辐合线下山向商南城区移动,随着地势逐渐降低,风暴 A 组合反射率(CR)不断增大(图 7b),强度不断增强,直下山至河谷地带(14:12 附近),CR 增至最大,达到 68 dBz。加之午后显著升温,在不稳定层结和较强的垂直风切变作用下迅速发展为强雹暴,可见地形的下坡有利于风暴 A 的加强发展。

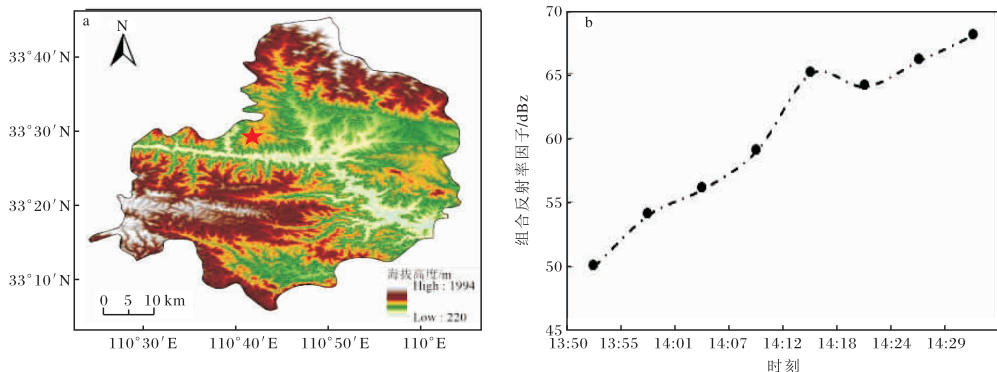


图 7 商南地形分布(a,五角星为风暴 A 初生地)、2018-05-15 风暴 A 下山时段组合反射率随时间演变(b)

4 风暴演变过程中的雷达回波分析

强对流天气具有尺度小、突发性等特点,在大尺度分析和预报中,很难准确把握局地强对流天气的发生和发展。前文分析指出,本次商洛市商南县强对流受高空天气尺度系统影响外,受到下垫面局地热力和动力条件的影响更为关键。以下进一步探讨雷暴发展中雷达回波演变特征。

4.1 风暴演变过程

由地面辐合线触发的风暴 A 生成后不断加强发展东移,同时受到出流边界的影响,在风暴 A 移动前侧不断有新雷暴生成。由图 8 可见,14:18 风暴 A 超过 55 dBz 的回波面积较前一时次明显增大,钩状回波已初步形成。14:24 强回波面积继续增大,回波中心强度已达 60 dBz。14:29 风暴 A 回波的钩状结构已非常明显,对应后侧入流,回波中心强度已达 65 dBz,此时商南地区还未开始降雹。14:35 风暴 A 中心最大强度达 65 dBz 以上,最大反射率因子面积较前一时次明显加大,风暴迅速发展,同时伴随明显的三体散射长钉,已发展为超级单体风暴,商南城区附近已出现降雹,其北侧有 B、C 对流单体生成。之后风暴 A 三体散射特征继续维持,回波中心强度并无衰减,中心强度最大依旧为 65 dBz 以上,14:41 雹

云回波顶高达 12 km,钩状回波特征明显,风暴 A 强度达到最大,发展相当旺盛,城区降大冰雹。此时,风暴 A 北侧的 B、C 对流单体迅速加强发展, C 对流单体最大反射率因子较前一时刻骤增至 50 dBz,并逐渐与 B 单体合并。14:46 二者合并后中心回波强度迅速升至 60 dBz 以上,这造成了商南北部曹营站短时强降水,10 min 降水量达 9.4 mm。直至 14:58 风暴 A 东移出商南境内(图略),至此商南境内降雹结束。在速度图上(图 9),14:29 对应风暴 A 钩状回波处可以明显看到一支后侧入流,其与出流气流形成气旋性旋转的正负速度对,旋转速度达 20 m/s。14:35 入流径向速度加大,气旋性旋转辐合加强,中心旋转速度增至 25 m/s,表明风暴 A 中上升气流开始加强,呈类似中气旋特征,维持了两个体扫,同时伴有明显的三体散射特征。之后,14:58 风暴 A 入流强度明显减弱,旋转速度强度减小,三体散射特征消失,风暴 A 移出商南境内。

综上所述,造成商南强冰雹的对流风暴正是强对流风暴 A,中心最大反射率因子长时间维持,整个降雹过程持续了约 20 min。在此期间,对流层平均层风向为西南向,风暴 A 的移动风向介于雷暴传播方向与平均层风向之间。

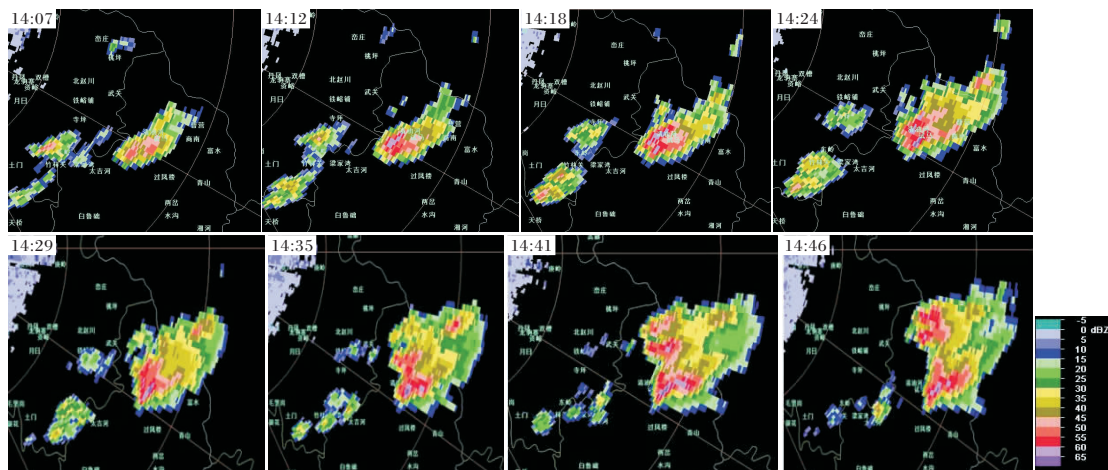


图8 2018-05-15 商洛雷达 1.5°仰角的反射率因子分布

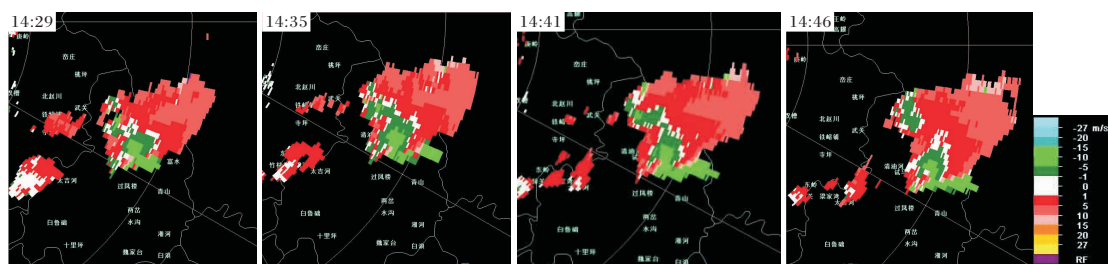


图9 2018-05-15 商洛雷达 1.5°仰角的基本速度分布

4.2 风暴垂直结构

为了深入分析风暴A的发展演变,在风暴A发展旺盛时段进行剖面,分析风暴A的垂直结构。由图10可见,在反射率因子剖面图上,可以清楚地看到风暴A存在回波穹窿,与低层钩状回波入流缺口的有界弱回波区相对应,说明有强上升气流存在。风暴前侧对应着明显回波悬垂,且中层回波中心超过65 dBz,55 dBz回波高度伸展9~12 km,远高于当天-20℃层高度(7.6 km),甚至-30℃层的高度(9 km),说明在冰雹增长层-30~-10℃存在丰富的过冷却水滴,非常有利于大冰雹的产生。从径向速度垂直剖面可以看到,在风暴入流一侧存在一支很强的斜升气流,并从上部流出,这支强烈的上升气流为风暴输送水汽,维持风暴的发展,并且其托举作用能够使小冰粒长成冰雹;另外有一支干冷的下沉气流从风暴后部中层流入,从风暴的底部流出,形成地面雷暴高压和冰雹落区。前侧强上升和后侧下沉气流错开,互不妨碍又相互促进,这是风暴流场自组织的一种机制或自维持结构,两股气流在3 km附近强烈辐合,有

利于强上升气流发展。从垂直液态积分水含量(VIL)来看(图11),刚开始降雹时风暴A中VIL中心已迅速增至65 kg/m²,在风暴A发展最强盛时中心强度增至70 kg/m²,这远远超过商洛地区冰雹预报指标,表明降大冰雹的可能性很大。

进一步,图12给出了商南站上空风暴A在发展最强时刻(14:46)反射率因子垂直分布廓线,以及商南站上空22 min(14:24—14:46)平均反射率因子垂直分布廓线。由于商南站距离商洛雷达有近100 km,因而在雷达0.5°仰角上商南站最低探测到的回波高度为2.4 km。由图可见,在风暴A发展最强时刻(14:46),反射率因子在垂直方向上呈先增大后减小分布。在低层反射率因子已达45 dBz以上,随着高度增加回波强度继续增大,在7 km附近存在回波极大值,最大反射率因子达65 dBz以上,之后回波强度开始减小,直至18.3 km高度处,反射率因子仍有13 dBz,可见风暴A发展是相当旺盛的。从商南站上空22 min平均反射率因子垂直分布廓线来看,其分布型与前者基本一致,在7 km附近也存在回波极大值

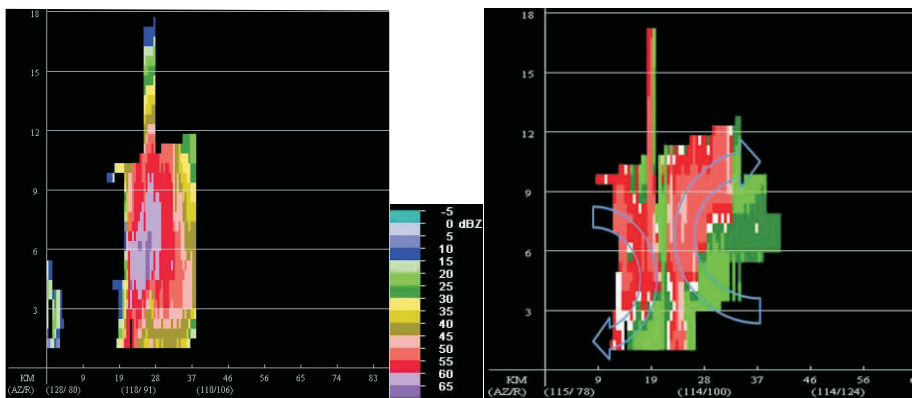


图 10 2018-05-15T14:46 商洛雷达反射率因子(a,沿雷达径向 128°)、
径向速度(b,沿雷达径向 115°,箭头代表气流方向)剖面

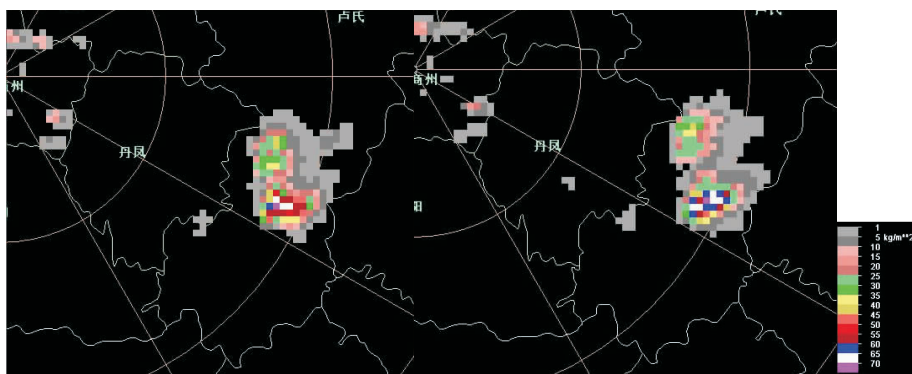


图 11 2018-05-15 商洛雷达垂直液态积分水含量(a 14:41,b 14:46)

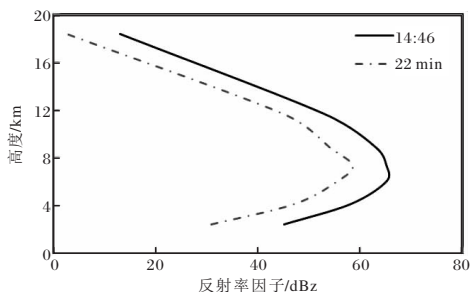


图 12 2018-05-15T14:46 商南站上空反射率因子垂直
分布廓线(实线)、2018-05-15T14:24—14:46 平均
反射率因子垂直分布廓线(虚线)

区,回波强度达到近 60 dBZ,回波伸展高度高,表明强风暴 A 发展迅速,维持时间较长。

5 强风暴特征参数演变

前文分析表明,随着强雹暴的迅速发展,其各项特征指数呈现出独有的特征。其中,由大量观测实践验证,VIL 跃增对大冰雹有较好的指示作用。由图 13 可以看出,随着最大反射率因子(DBZM 下简称 Z_m)增大,VIL 也在增大。出现冰

雹之前,VIL 值有两次明显的跃增。13:38 风暴发展初期 VIL 仅为 2 kg/m^2 ,此时风暴高度还不到 3 km,经过 5 个体扫后 VIL 值迅速增至 56 kg/m^2 ,风暴顶高度迅速向上伸展至 9 km。经过一个体扫后风暴 VIL 值又迅速增至 70 kg/m^2 ,反映了云体内冰雹粒子在生长区正迅速碰并长大。此后 VIL 值缓慢增长,维持在 $70 \sim 80 \text{ kg/m}^2$,风暴发展高度达到 10~12 km,雹云发展非常旺盛,雹云内的冰粒已经充分长大,对应商南地区特大冰雹。直至 15:00 左右,VIL 值突然下降到 60 kg/m^2 ,云内水汽含量急剧下降,商南降雹趋于结束。由此可见,降雹前约 10~15 min,商南地区 VIL 值一个体扫内跃增量达 20 kg/m^2 ,这为冰雹的预警提供了有价值的信息。而 VIL 值出现多次跃增是由于雹块降落后上升气流又占据主导地位,使得生长区较小的冰雹得到进一步增长,使 VIL 值有所增大,这也是雹云得以长时间维持的重要原因。

近几年有研究指出,相较于 VIL,VIL 密度的演变更能细致地反映雹云的快速增长过程。Am-burn and Wolf^[26]定义 VIL 密度为 VIL 与风暴顶高度之比,以提醒预报员大冰雹与周围气块的特性密切相关,VIL 密度增大时,冰雹核会增大,风暴变得更剧烈,并指出 90% 雹暴的 VIL 密度 $\geq 3.5 \text{ g/m}^3$,而几乎所有 VIL 密度 $\geq 4.0 \text{ g/m}^3$ 的风暴都会产生直径 $\geq 2 \text{ cm}$ 的冰雹。Hart^[27]等证实了 VIL 密度对预报大冰雹天气有较好的指示作用。目前国内也有不少气象工作者通过分析 VIL 密度跃增的阈值来作为大冰雹的临近预报指标^[28-29],但其与 VIL 在极端强雹暴发展演变过程中的具体对比和判据优势研究较少,在西北地区强对流天气中的应用研究也相对较少。就此次过程,本文发现伴随 VIL 值两次明显的跃增,VIL 密度变化几乎与之同步(图 13)。第一次跃增时 VIL 密度达到 6.1 g/m^3 ,略有减弱后又迅速增至 7.2 g/m^3 ,达到最大,此后 VIL 密度维持在 7 g/m^3 左右,直至降雹结束而减弱。本文在风暴 A 整个发展演变过程(13:38—16:41)中将 VIL 和 VIL 密度分别与最大反射率因子 Z_m 做时滞相关(图 14)。结果发现在同期时,二者均与 Z_m 呈显著正相关关系,VIL 与 Z_m 相关系数达 0.88,略高于 VIL 密度与 Z_m 相关系数。而在提前 6 min、12 min、18 min、24 min 时,虽然二者与 Z_m 相关系数均在减小,但 VIL 密度与 Z_m 相关性明显要高于 VIL 与 Z_m 相关性,即在超前不同时刻,VIL 密度与 Z_m 的相关系数都高于后者。特别是在提前 24 min 时,VIL 密度与 Z_m 的相关系数为 0.45,仍通过了 0.01 信度检验,这表明相较 VIL 的跃增,VIL 密度的变化能更好地提前指示大冰雹,可作为商南大冰雹一个超前的显著预警指标。由于此次突降大冰雹在商南地区较为罕见,前人总结的商洛地区冰雹各项潜势预报指标具有一定局限性,因而可用 VIL 密度值明显跃增至 5.5 g/m^3 提前 24 min 预警大冰雹。

为了进一步验证 VIL 密度阈值的预警效果,选取了陕西 2015 年以来不同强度的冰雹过程。由表 1 可见,对于不同强度的冰雹过程,雹暴最大反射率因子几乎都超过 60 dBZ,VIL 值几乎都

超过 45 kg/m^2 ,VIL 密度几乎均在 5.0 g/m^3 以上。特别是对于佳县和安塞的大冰雹过程,最大 VIL 密度均超过 6.0 g/m^3 ,对于清涧和神木中等强度冰雹过程,最大 VIL 值分别仅为 31 kg/m^2 和 34 kg/m^2 ,VIL 密度却有很好的指示作用。因此,VIL 密度跃增对于不同强度的冰雹过程有较好的指示作用。同时,可结合强风暴反射率因子中心值超过 60 dBZ,VIL 值超过 45 kg/m^2 加以补充和完善陕西冰雹预警指标。

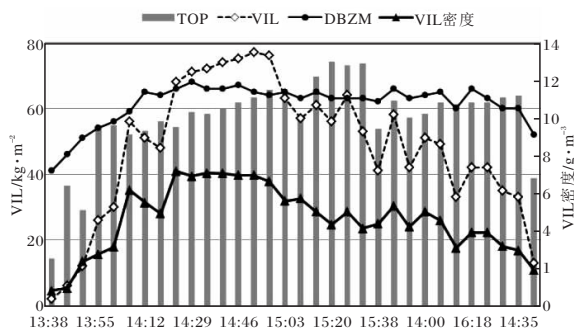


图 13 风暴 A 的 VIL、VIL 密度、回波顶高度(TOP)、最大反射率因子(DBZM)随时间的演变

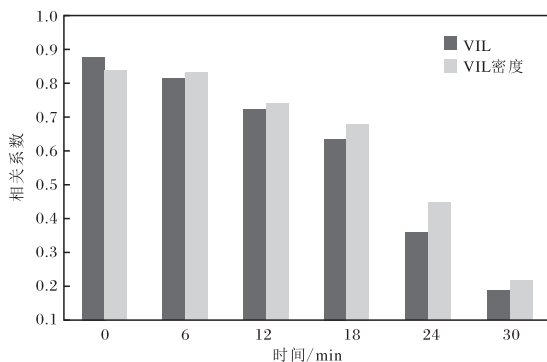


图 14 风暴 A 的 VIL、VIL 密度与最大反射率因子同时刻、超前相关系数

6 结论与讨论

(1)此次发生在商南地区的强冰雹天气,其有利的环境背景是 500 hPa 河套东部低槽与地面气旋暖区相配置,上下层热力平流的差异使原来上干下湿的不稳定层结更加不稳定,加强了地面辐合以及不稳定能量的积累。地面中尺度辐合线的加强触发了对流,高空急流的强辐散作用有利于低层的辐合上升运动,较强的深层垂直风切变使得对流云团发展成超级单体风暴。

表 1 2015—2017 年陕西 6 次冰雹天气过程雷达参数特征

站点	时间	冰雹直径/mm	距离雷达/km	最大反射率因子/dBz	VIL/(kg/m ²)	VIL 密度/(g/m ³)	TOP/km
佳县	2016-06-04	40	69.6	59	54	6.59	8.2
安塞	2016-09-10	99	32.0	72	57	6.20	9.2
子长	2016-05-04	15	60.0	70	50	7.14	7.0
宁强	2015-07-16	12	78.0	61	48	5.93	8.1
清涧	2016-06-30	13	135.0	60	31	6.89	4.5
神木	2017-08-08	15	87.0	60	34	4.66	7.3

(2)有利的地形、地面中尺度辐合线的动力抬升作用是超级单体风暴发生发展和维持的重要原因。

(3)此次强对流风暴发展迅速,中心最大反射率因子长时间维持在 65 dBz 以上,呈钩状回波,并伴有三体散射长钉。雹暴发展非常旺盛,最大 VIL 值高达 77 kg/m²,回波伸展高度至 12 km 左右,远超过当天-20℃高度,冰雹增长层存在丰富的过冷却水滴,有利于大冰雹的产生。强雹暴在 3 km 附近强烈辐合,中心存在气旋性旋转的正负速度对,旋转速度达 25 m/s,有利于强上升气流发展。

(4)VIL 值和 VIL 密度的跃增可用作大冰雹的预警指标,但相较 VIL 的跃增,VIL 密度的变化能更好地提前指示大冰雹,可用 VIL 密度值明显跃增至 5.5 g/m³ 提前 24 min 预警大冰雹,作为商南大冰雹一个超前的显著预警指标。同时,可结合强风暴反射率因子中心值超过 60 dBz, VIL 值超过 45 kg/m² 补充完善预警指标,进一步提升陕西冰雹预警能力。

(5)值得注意的是,商洛地区地形结构复杂,此次大冰雹过程罕见,突发性、致灾性很强,本文对于地形对强风暴影响的分析,只给出了初步定量分析,后期有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 寿绍文,励申申,姚秀萍.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003,324-326.
- [2] 俞樟孝,余连根,从黎强.浙江大范围强对流天气中的中尺度 α 低压[J].气象学报,1990,48(4):500-505.
- [3] 孙明生,汪细明,罗阳.北京地区强对流天气展望预报方法研究[J].应用气象学报,1996,7(3):336-343.
- [4] 毛冬艳,乔林,陈涛.2004 年 7 月 10 日北京暴雨的中尺度分析[J].气象,2005,31(5):42-46.
- [5] 余小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006,118-119.
- [6] 郑媛媛,朱红芳,方翔,等.强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J].高原气象,2009,28(3):617-625.
- [7] 曾明剑,吴海英,王晓峰,等.梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J].气象,2016,42(3):280-293.
- [8] 郑媛媛,余小鼎,方翀,等.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,2004,62(3):317-328.
- [9] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等.一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J].大气科学,2008,32(3):508-521.
- [10] 肖艳姣,张家国,万蓉,等.切边线暴雨中尺度系统的多普勒雷达资料分析[J].气象,2005,31(2):35-38.
- [11] 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶.一次冰雹风暴的 CIN-RAD/SA 产品分析[J].应用气象学报,2004,15(5):579-589.
- [12] MARKOWSKI P M. Hook echoes and rear flank downdrafts: A review[J]. Monthly Weather Review, 2002,130(4):852-876.
- [13] KUMJIAN M. Precipitation properties of supercell hook echoes[J]. Electronic J Severe Storms Meteor,2011,6(5):1-21.
- [14] SKINNER P S,WEISS C C,FRENCH M M,et al. VORTEX2 Observations of a low-level mesocyclone with multiple internal rearflank downdraft

- momentum surges in the 18 May 2010 Dumas, Texas, supercell[J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(8):2935-2960.
- [15] 赵坤,周仲岛,潘玉洁,等.台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析[J]. *气象学报*, 2008, 66(4):637-651.
- [16] 胡明宝,高太长,汤达章.多普勒天气雷达资料分析与应用[M].北京:解放军出版社,2000,146-149.
- [17] EDWARDS R, THOMPSON R L. Nationwide Comparisons of Hail Size with WSR-88D Vertically Integrated Liquid Water and Derived Thermodynamic Sounding Data[J]. *Weather and Forecasting*, 1998, 13(2):277-285.
- [18] 付双喜,安林,康凤琴,等. VIL 在识别冰雹云中的应用及估测误差分析[J]. *高原气象*, 2004, 23(6):810-814.
- [19] 付双喜,王致君,陈乾,等.甘肃中部一次强对流天气的多普勒雷达特征分析[J]. *高原气象*, 2006, 25(5):932-941.
- [20] 王炜,贾惠珍.用雷达垂直累积液态水含量资料预测冰雹[J]. *气象*, 2002, 28(1):47-48.
- [21] 李薇,李永振,汤达章.使用 VIL 选择人工增雨作业区域[J]. *气象科学*, 2006, 26(4):432-434.
- [22] 刘德祥,白虎志,董安祥.中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究[J]. *高原气象*, 2004, 23(6):796-800.
- [23] 赵文慧,姚展予,贾烁,等,高亮书.1961~2015年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因素研究[J]. *大气科学*, 2019, 43(3):539-551.
- [24] 王若升,董安祥,樊晓春,等.溃变理论在西北地区冰雹天气预报中的应用[J]. *干旱气象*, 2006, 32(2):19-24.
- [25] 陈双,王迎春,张文龙,等.复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. *气象*, 2011, 37(7):802-813.
- [26] AMBURN S A, WOLF P L. VIL density as a hail indicator[J]. *Weather and Forecasting*, 1997, 12(3):473-478.
- [27] 覃靖,潘海,刘蕾.柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. *气象*, 2017, 43(6):745-755.
- [28] 张桂莲,常欣,黄晓璐,等.东北冷涡背景下超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. *高原气象*, 2018, 37(5):1364-1374.