

曾妮,方鹏,吴哲红,等. 贵州冬季一次罕见风雹天气过程分析[J]. 中低纬山地气象,2023,47(3):15-21.

贵州冬季一次罕见风雹天气过程分析

曾 妮¹,方 鹏¹,吴哲红¹,李启芬²,邓 安¹,王兴菊¹

(1. 贵州省安顺市气象局,贵州 安顺 561000;2. 贵州省贵阳市气象局,贵州 贵阳 550001)

摘 要:该文利用常规气象观测资料、多普勒雷达资料和 FNL 再分析资料,对 2022 年 1 月 4 日贵州出现的一次风雹天气过程进行分析。结果表明:此次风雹天气由高空槽、低涡切变线、低空急流、地面热低压和地面辐合线共同作用产生;降雹前有能量锋的建立,降雹期间锋区呈增强趋势;湿层配置表现为 500 hPa 的空气偏湿,不是明显的上干下湿层结,0℃层高度和-20℃层高度比春季降雹时的高度偏低 70~100 hPa;与贵州春、夏季的雷暴大风对流参数比较,此次过程的 CAPE 和 PWAT 小于春、夏季的阈值,而 DCAPE、 T_{75} 和 T_{485} 明显高于春、夏季阈值;对流风暴的影响过程分为 2 个阶段,第 1 阶段的回波带强度更强,组织性更好,形成了弓形回波复合体(BEC),并伴有后侧入流缺口(RIN),是雷暴大风出现的主要原因,持续出现的三体散射长钉(TBSS)、高悬的强回波以及宽阔的弱回波区(WER),使得第 1 阶段的降雹密度较大,且局地产生大冰雹;第 2 阶段的回波强度较弱,且组织性较差,因此只产生小冰雹,降雹密度也较小。

关键词:弓形回波复合体;三体散射长钉;冬季;风雹天气;贵州

中图分类号:P458.3 **文献标识码:**A

Analysis of a Rare Wind and Hail Weather Process in Guizhou in Winter

ZENG Ni¹, FANG Peng¹, WU Zhehong¹, LI Qifeng², DENG An¹, WANG Xingju¹

(1. Anshun Meteorological Bureau of Guizhou Province, Anshun 561000, China ;
2. Guiyang Meteorological Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: Based on conventional meteorological observation data, Doppler radar data and FNL reanalysis data, a hailstorm process in winter on January 4, 2022 in Guizhou province was analyzed. The results show that the hailstorm process was produced by the combined action of upper trough, low vortex with shear line, low-level jet, surface thermal low pressure and surface convergence line. The energy front was established before hail shooting, and the frontal zone was strengthened during hail shooting. The wet layer configuration showed that the air was humid at 500 hPa, which was not an obvious upper-layer dry and lower-layer wet. The height of 0℃ layer and -20℃ layer was 70~100 hPa lower than that of spring hail. Compared with the convective parameters of thunderstorm winds in spring and summer in Guizhou province, the CAPE and PWAT value of this process were lower than the thresholds of relevant parameters in spring and summer, while the values of DCAPE, the T_{75} and the T_{485} were significantly higher than the thresholds of relevant parameters in spring and summer. The influence process of convective storms was divided into two stages. In the first stage, the echo intensity was strong and well organized, forming the bow echo complex (BEC) with the rear inflow notch (RIN), which was the main reason for the occurrence of thunderstorm winds. The continuous occurrence of three-body scatter spire (TBSS), high hanging strong echo and wide weak echo region (WER) made the hail density in the first stage high and locally accompanied by large hail. In the second stage, the echo intensity was weak and the organization was poor, so only small hail was generated, and the hail density was sparse.

Key words: bow echo complex; three-body scatter spike; winter; hailstorm weather; Guizhou

收稿日期:2022-06-28

第一作者简介:曾妮(1991—),女,工程师,主要从事天气预报工作,E-mail:563975946@qq.com。

资助项目:贵州省山地气候与资源重点实验室基金项目(QHLSSLJ[2022]-02);安顺市冰雹短临预警指标研究。

0 引言

风雹天气是指以冰雹和雷暴大风为主的强对流天气,具有突发性、持续时间短、局地性强及破坏力强等特点,因此预报难度较大,许多气象学者对风雹天气的环境条件、雷达回波特征及天气形势等进行大量研究^[1-14]。华雯丽等^[15]对山东雷暴大风研究发现 SSI、SWEAT、LI 等指数对山东雷暴大风的发生具有较好的指示性。郑永光等^[16]对冷涡影响下中国雷暴大风和冰雹的分布特征分析发现,冷涡影响的雷暴大风和冰雹过程多发生于春、夏两季。叶东^[17]对河南省一次风雹天气进行分析发现,地面辐合线是风雹天气的触发系统,其稳定维持利于对流单体的增强。周明飞等^[18]对贵州一次极端风雹天气过程分析发现,暖湿气流输送和较强的垂直风切变有利于风雹的加强和维持。罗喜平等^[19]对贵州 2 次大冰雹天气过程进行对比分析发现,0℃层和-20℃层的高度差较小但垂直温度梯度较大时,更有利于形成大冰雹。贵州冰雹主要出现在 2—5 月,属于典型的春季降雹^[20-22]。李力等^[23]分析 2012—2016 年贵州省 33 个雷暴大风日的时空分布,发现贵州省的雷暴大风主要出现在 3—10 月,1 月出现雷暴大风的可能性极小。以上研究表明,贵州的风雹天气主要出现在春季,2022 年 1 月 4 日贵州出现局地性风雹天气过程,是贵州冬季罕见的天气现象。本文利用常规气象观测资料、多普勒雷达资料和 FNL 再分析资料,对此次风雹天气过程的环境条件和雷达回波特征进行分析,以期对贵州冬季风雹天气的预报和预警提供一定的参考依据。

1 天气实况和灾情

2022 年 1 月 4 日 16—21 时,贵州省出现冬季罕见的风雹天气,全省共 15 个区(市、县)域内 52 个乡镇(镇、街道)降雹,冰雹直径普遍在 5~10 mm 之间,普定县和贵安新区局地出现直径为 20 mm 的大冰雹,降雹密度在 15~400 粒·m⁻²,最大降雹密度为 300~400 粒·m⁻²,出现在清镇市流长苗族乡;在降雹的区域内有 6 个站出现 8 级以上(≥ 17.2 m·s⁻¹)大风,最大风速为普定县坪上站 19.5 m·s⁻¹(表 1)。由降雹落区(图 1)看出,冰雹主要出现在贵州中西部地区,影响范围较小,局地性强。

据统计,此次风雹天气共造成 22 009 人受灾,农作物受灾面积达 3130.7 hm²,因灾直接经济损失 1294.8 万元。

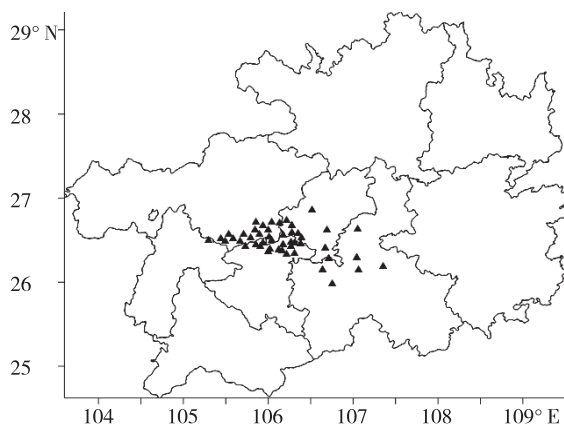


图 1 2022 年 1 月 4 日贵州省降雹落区

Fig. 1 Hail area in Guizhou Province on January 4, 2022

表 1 2022 年 1 月 4 日贵州省雷暴大风实况

Tab. 1 Thunderstorm gale in Guizhou Province on January 4, 2022

站名	普定县坪上	云岩区向阳小学	花溪区燕楼大草坡	花溪区青岩新楼村	龙里县龙里	贵定县昌明
风速/(m·s ⁻¹)	19.5	17.6	18.4	18.6	17.6	17.6
出现时间	17 时 15—20 分	18 时 35—40 分	18 时 39—43 分	19 时 11—12 分	19 时 26—28 分	19 时 27—29 分

2 环流背景和环境条件分析

2.1 环流背景

对此次风雹天气的环流背景进行分析。从 1 月 4 日 08 时高空综合图(图 2a)看出,500 hPa 在四川东部和云南东部分别有高空槽建立,贵州位于槽前的正涡度平流区中,为强对流的发生提供了天气尺度的上升运动条件;700 hPa 西南低空急流位于贵州南部;850 hPa 西南涡中心位于重庆,“人”字形的低涡切变线分别位于四川东南部和江南北部,四川东南部的低涡切变线东移南压影响贵州,低空急流位于广西北部—湖南中部,贵州位于低空急流左侧,

有利于水汽的输送及辐合上升,同时对流层中、低层贵州位于温度露点差 <1 ℃的饱和区中,水汽条件较好;海平面气压场(图略)上,热低压中心位于川渝黔之间,贵州西部受热低压控制,午后贵州中西部和南部的最高气温在 15℃以上,使得近地层的能量大量积聚。

从地面辐合线的演变(图 2b)看出,09 时开始在六盘水西部—安顺北部—贵阳南部一线有地面辐合线生成,且稳定维持到 17 时,17 时以后地面辐合线开始东移南压,20 时移至黔南州中部一线,对流单体在地面辐合线附近增强,其移动路径与地面辐合线走向基本一致。综上所述,500 hPa 高空槽、

850 hPa 低涡切变线、低空急流和地面热低压为此次风雹天气的发生提供了有利的天气尺度背景条件,

地面辐合线为对流系统的增强和触发提供了有利的动力条件。

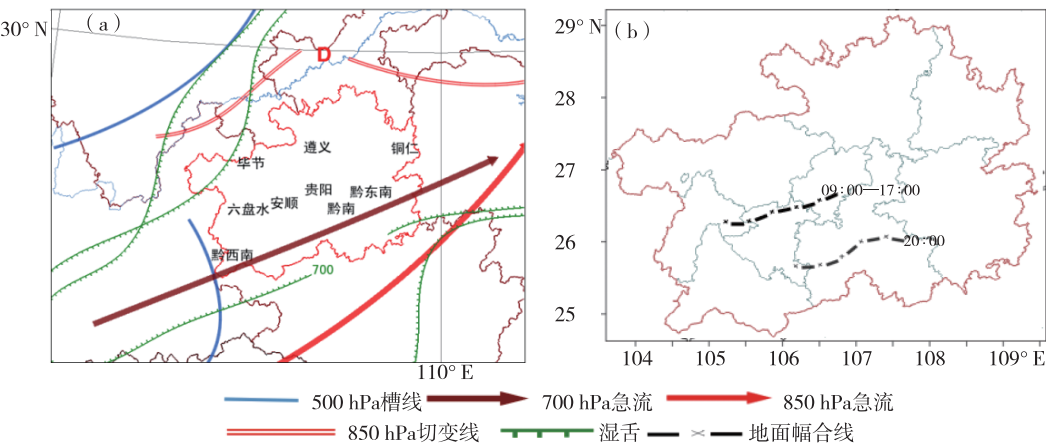


图2 2022 年 1 月 4 日 08 时高空综合图(a)和地面辐合线演变(b)

Fig. 2 The upper - air composite chart (a) and the evolution of ground convergence line (b) at 08:00 on January 4, 2022

2.2 能量和对流不稳定条件

在 4 日 08 时贵阳探空站的 $T-lnp$ 图(图 3a)中,贵阳 700 hPa 以下相对湿度 $\geq 80\%$,700 hPa 到 500 hPa 之间有一定的干层,但不是典型的“喇叭口”形状,从近地层到 700 hPa 风随高度顺转,有暖平流。K 指数为 $34.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,SI 指数为 $-0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$,暖干盖指数 L_s 为 $-28.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明强对流发生前大气为不稳定状态。850 hPa 与 500 hPa 的温差 T_{85} 为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到贵州出现强对流的标准^[24]。抬升凝结高度较低,在 879 hPa 附近,较小的外力作用就能抬升气块,形成对流泡。0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度 H_0 为 3.10 km(700 hPa 附近), $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度 H_{-20} 为 6.19 km(470 hPa

附近),朱乾根等^[25]研究指出 H_0 在 600 hPa 附近, H_{-20} 在 400 hPa 附近,有利于冰雹形成,此次过程的 H_0 和 H_{-20} 比这一阈值偏低 70 ~ 100 hPa。

从降雹区上空假相当位温 θ_{se} 随时间的变化(图 3b)看出,近地层到 600 hPa 假相当位温 θ_{se} 随高度减小,为对流性不稳定。4 日 17 时以前在 720 ~ 650 hPa 附近有能量锋存在,17 时以后锋区略有减弱,并向上伸展到 600 hPa,在降雹期间对流层中低层 θ_{se} 明显增大,中心值达 322 K 左右,高能舌从近地层伸展到 800 hPa 附近,20 时以后低层 θ_{se} 开始减弱,逐渐转为稳定的冷气团。

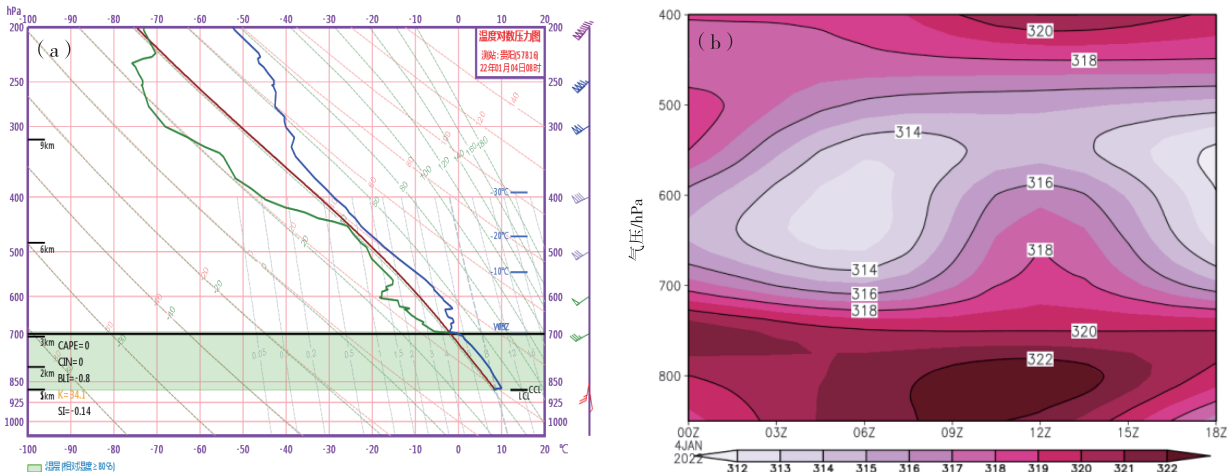


图3 4 日 08 时贵阳站的 $T-lnp$ 图(a)相当位温 θ_{se} 随时间的变化(b,世界时)

Fig. 3 $T-lnp$ diagram of Guiyang station at 08:00 the 4th (a) variation of potential equivalent temperature with time(b,universal time)

李力等^[23]对贵州雷暴大风的对流参数特征进行统计分析后选取了 8 个对流参数作为预报贵州雷暴大风的指标,并分别给出春、夏两季的对流参数阈值。表 2 为 2022 年 1 月 4 日 08 时对流参数与雷暴大风阈值的对比。由表 1 可以看出,除了对流有效位能 CAPE 和整层可降水量 PWAT 小于春、夏两

季的阈值外,其余 6 个对流参数均达到春、夏两季的阈值,并且下沉对流有效位能 DCAPE、 T_{75} 和 T_{d85} 明显高于春季和夏季阈值,表明下沉气流的强度和中、低层的温差对贵州冬季出现雷暴大风有较好的指示性。

表 2 2022 年 1 月 4 日 08 时对流参数实况和雷暴大风阈值对比

Tab. 2 Comparison of convective parameter and thunderstorm gale threshold at 08:00 on January 4, 2022

对流参数	CAPE/(J · kg ⁻¹)	CIN/(J · kg ⁻¹)	DCAPE/(J · kg ⁻¹)	PWAT/(kg · m ²)	V _{ws} /(10 ⁻³ · s ⁻¹)	T ₇₅ /℃	T ₈₅ /℃	T _{d85} /℃
实况	120	0	243.4	22	0.5	16.2	25	30
春季指标	≥200	≤100	≥90	≥26	≥1.5	≥14	≥24	≥24
夏季指标	≥800	≤50	≥200	≥35	≥0.5	≥14	≥26	≥24

注: T_{75} 为 700 hPa 与 500 hPa 温差, T_{85} 、 T_{d85} 分别为 850 hPa 与 500 hPa 温差、温度露点差, V_{ws} 为垂直风切变。

2.3 水汽和动力条件

强对流天气发生的基本条件之一是水汽条件。俞小鼎等^[2]研究指出,风暴常形成于低层湿舌区或强水汽辐合区。从图 4a 看出 4 日 14 时贵州区域内 850 hPa 的比湿在 6 ~ 9 g · kg⁻¹ 之间,其中降雹区域的比湿在 8 ~ 9 g · kg⁻¹,在贵州的南部有湿舌存在,降雹区域位于湿舌的顶端,同时在六盘水—安顺北部一线比湿梯度较大。由 4 日 08 时—5 日 02 时 850 hPa 水汽通量散度和水汽通量的变化(图 4b~e)看出,4 日 08 时从广西—黔湘交界处为水汽输送带,在贵州的中西部和东北部分别有 2 个弱的水汽辐合区,14 时分别从云南和广西各有一支水汽输

送带,2 支水汽输送带在贵州西部汇合,贵州西部的水汽辐合明显增强,强度达到 $(-6 \sim -7) \cdot 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,20 时云南方向的水汽输送减弱,从广西—黔湘交界处为水汽输送增强,同时水汽辐合区略向东南方向移动,中心位于安顺,强度增加到 $(-7 \sim -8) \cdot 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,20 时以后水汽辐合逐渐减弱东移,5 日 02 时移到贵州东南部。

以上分析表明,降雹区低层水汽条件充沛,并且在降雹前有 2 支水汽输送带输送水汽,在降雹区辐合上升,降雹期间水汽辐合强度呈增强趋势,为冰雹的产生提供了充分的水汽条件。

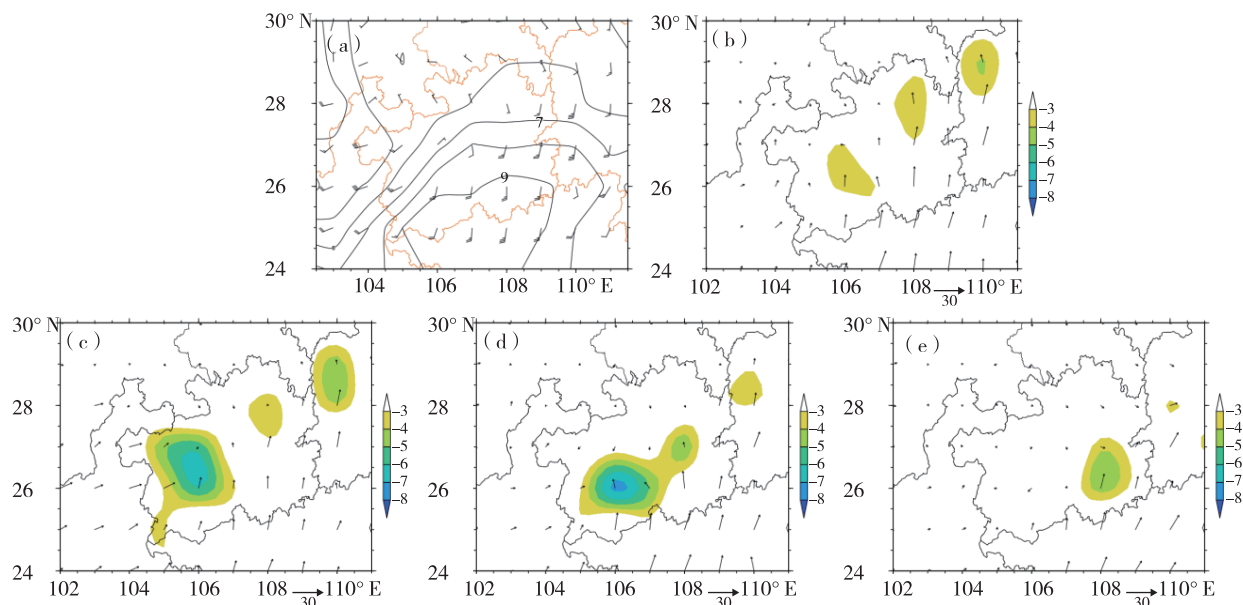


图 4 2022 年 1 月 4 日 14 时 850 hPa 比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和风(a)、4 日 08 时(b)、14 时(c)、20 时(d)及 5 日 02 时(e)850 hPa 水汽通量散度(填色,单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量(向量,单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 850 hPa specific humidity (a, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and wind at 14:00 on January 4, 2022; 850 hPa water vapor flux divergence (color filling, unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux (vector, unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 (b), 14:00 (c), 20:00 (d) on January 4, 2022 and 02:00 (e) on January 5, 2022

对降雹密度较大和冰雹直径较大的2个站点(西秀区大西桥站、贵定昌明站)做时间高度剖面图(图5a、5b)。由图5a看出西秀区大西桥站降雹期间(17时55—18时01分)相对湿度 $\geq 90\%$ 的区域在800 hPa以下,从低层到高层相对湿度迅速降低,在700 hPa附近相对湿度已降至60%左右。700 hPa以上相对湿度略有增加,600 hPa附近增至65%左右,但在降雹期间总体呈现“上干下湿”的结构。300 hPa以下垂直速度均为负值,在620 hPa附近有1个强上升中心,中心值为 $-2.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,表明从近地面到300 hPa为一致的上升运动,上升气流较强,利于对流单体的发展。18时01分以后随着对流层中层的湿度明显增加,破坏了“上干下湿”的条件,降雹结束。由图5b看出贵定县昌明站降雹期间

(19时27—29分)相对湿度 $> 90\%$ 的区域在850 hPa附近,且湿层较浅薄,800 hPa附近相对湿度已降至60%以下,与西秀区大西桥站类似。在600 hPa附近湿度有所增加,200 hPa以下为一致的上升运动,有3个强上升运动中心,最大中心值为 $-1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,贵定县昌明站的降雹时间仅为2 min,但降雹密度达 $300 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$,表明对流单体的强度较强。

分析降雹区上空散度场随时间的变化(图5c),降雹区从近地面到750 hPa为辐合区,且在降雹期间低层辐合强度增强,中心值为 $-80 \cdot 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$,750~400 hPa附近为辐散区,辐散中心值为 $40 \cdot 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$,这种低层辐合,高层辐散的配置,使得上升气流进一步的加强。

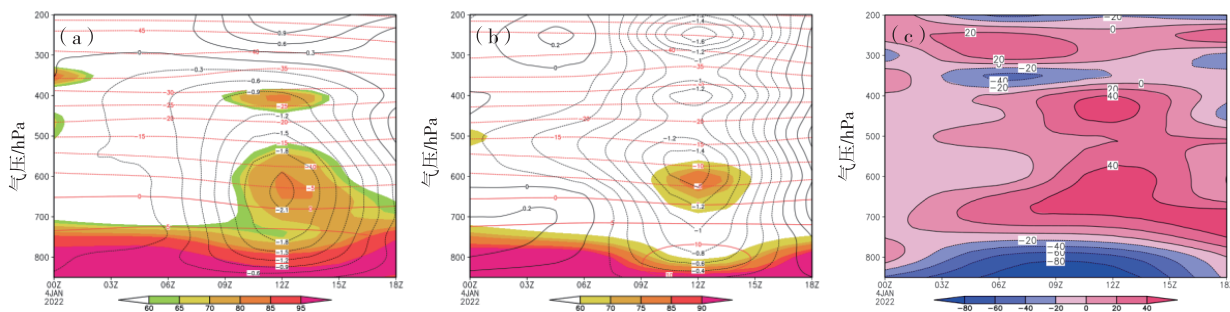


图5 2022年1月4日西秀区大西桥站(a)和贵定县昌明(b)相对湿度

(填色,单位:%)、垂直速度(黑线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)及温度(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$)的时间—高度剖面(黑色竖线:降雹开始时间),降雹区域散度(c,单位: $10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$),图中时间为世界时

Fig. 5 Daxiaoqiao in Xixiu (a) and Changming in Guiding(b) of relative humidity

(color filling, unit:%), vertical velocity (black line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$) time – altitude profile (black vertical line: hail start time), hail area divergence (c, unit: $10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$) on January 4, 2022

3 雷达回波特征分析

对此次风雹天气的雷达回波演变过程进行分析发现,对流风暴的影响过程分为2个阶段,分别由2个回波带产生。

第1阶段在15时左右在纳雍县南部有东北—西南向的弱回波带生成,并向东南方向移动发展。16时04分回波带进入织金县北部,回波强度明显增强,中心值为55~60 dBz。16时16分在强回波带附近的乡镇开始降雹,初始阶段(16时16分—17时13分)冰雹直径普遍在3~5 mm之间,降雹密度在30~80 $\text{粒} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。17时15分开始回波带发展为弓形回波复合体(BEC),并且存在后侧入流缺口(RIN),RIN持续5个体扫,向下沉气流提供了干燥且高动量的空气,通过垂直动量交换和增加雨水的蒸发,增加地面附近气流的出流速度,利于大风的产生^[26]。同时在17时20—42分期间出现明显

的三体散射长钉(TBSS)(图6a),由于贵州使用的是C波段雷达,在C波段雷达上出现三体散射长钉不一定会有大冰雹,小冰雹也能出现三体散射现象,但TBSS持续20 min,表明强风暴核的影响时间较长^[26]。反射率因子剖面(图7a)上有明显的回波悬垂特征, $> 50 \text{ dBz}$ 的强回波伸展到9 km附近、在 -20°C 层高度之上, $> 65 \text{ dBz}$ 的强回波伸展到6 km附近,低层有宽阔的弱回波区(WER),利于大冰雹或强降雹的产生^[26]。在强回波带所经之地有50个乡镇出现降雹,最大冰雹直径为20 mm,最大降雹密度为300~400 $\text{粒} \cdot \text{m}^{-2}$;6个站出现8级大风,最大风速为 $19.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;20时05分回波带移出都匀市江洲镇并逐渐减弱,第一轮风雹天气结束。

第2阶段在19时47分关岭县西部有零星的回波单体生成并向东移动,21时03分移到紫云县东部,并排列成南—北向的弱回波带,此时最大反射率因子为40 dBz,之后向东北方向移动,回波发展速

度较慢,21 时 42 分移至惠水县中部(图 6b),其回波中心最大强度为 55 dBz,从反射率因子剖面图(图 7b)看出,55 dBz 的强回波最大伸展高度在 6 km 附近,回波悬垂特征明显,低层有宽阔的弱回波区(WER);21 时 45—51 分惠水县雅水镇和涟江街道降雹,冰雹直径为 6~9 mm,降雹密度为 15~20 粒 $\cdot$ m $^{-2}$ 。

以上分析表明,第 1 阶段的回波带强度更强,组

织性更好,形成了弓形回波复合体(BEC),并伴有后侧入流缺口(RIN),是雷暴大风出现的主要原因。持续出现的三体散射长钉(TBSS)、高悬的强回波以及宽阔的弱回波区(WER),使得第 1 阶段的降雹密度较大,且局地产生大冰雹。第 2 阶段的回波强度较弱,且组织性较差,因此只产生小冰雹,降雹密度也较小。

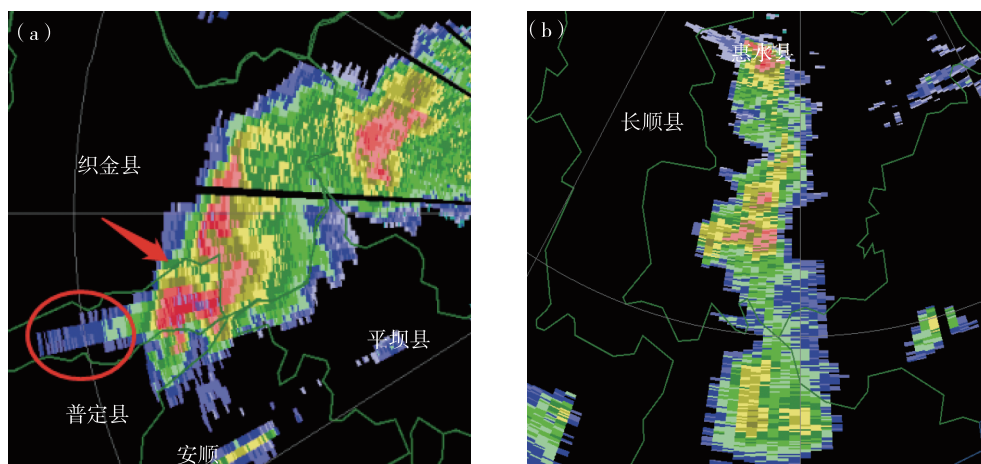


图 6 2022 年 1 月 4 日雷达组合反射率因子(a:17 时 31 分,b:21 时 42 分)

Fig. 6 The radar combined reflectivity factor on January 4, 2022(a. 17:31, b. 21:42)

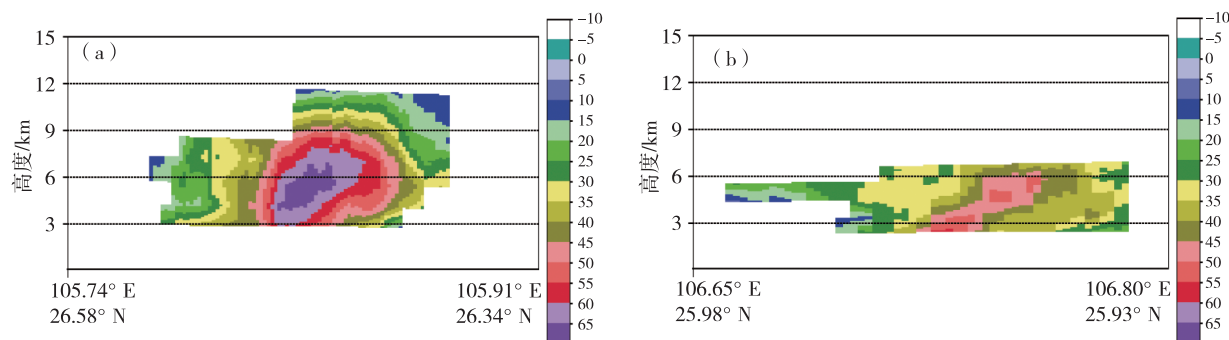


图 7 2022 年 1 月 4 日反射率因子剖面(a:17 时 20 分,b:21 时 47 分)

Fig. 7 The reflectivity factor profile on January 4, 2022(a. 17:20, b. 21:47)

4 结论与讨论

(1) 高空槽、低涡切变线、低空急流和地面热低压为此次风雹天气的发生提供了有利的天气尺度背景条件,地面辐合线为对流系统的增强和触发提供了有利的动力条件。

(2) 此次风雹天气的湿层配置表现为 500 hPa 的空气偏湿,不是明显的上干下湿层结,不同于典型强对流天气的“喇叭口”探空;0℃层高度和-20℃层高度比春季降雹时的高度偏低 70~100 hPa。

(3) 此次冬季雷暴大风的对流参数与贵州春、夏季的雷暴大风对流参数比较,CAPE 和 PWAT 小

于春、夏季的阈值,而 DCAPE、 T_{75} 和 T_{dB5} 明显高于春、夏季阈值,表明下沉气流的强度和中、低层的温差对贵州冬季出现雷暴大风有较好的指示性。

(4) 对流风暴的影响过程分为 2 个阶段,第 1 阶段的回波带强度更强,组织性更好,形成了弓形回波复合体(BEC),并伴有后侧入流缺口(RIN),是雷暴大风出现的主要原因。持续出现的三体散射长钉(TBSS)、高悬的强回波以及宽阔的弱回波区(WER),使得第 1 阶段的降雹密度较大,且局地产生大冰雹。第 2 阶段的回波强度较弱,且组织性较差,因此只产生小冰雹,降雹密度也较小。

参考文献

- [1] 俞小鼎. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 2014, 40(6): 649-654.
- [2] 俞小鼎. 风雹天气临近预报[M]. 北京: 中国气象局培训中心, 2012.
- [3] 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.
- [4] 于怀征, 刁秀广, 孟宪贵, 等. 山东省一次罕见强对流天气的环境场及雷达特征分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(5): 477-486.
- [5] 王兴菊, 周文钰, 蒙军, 等. 安顺市一次飚线天气过程的诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 11-18.
- [6] 曾妮, 邓安, 方鹏, 等. 一次局地性强冰雹天气的环境背景及雷达回波特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(2): 23-27.
- [7] 杜牧云, 赵娴婷, 周伶俐, 等. 鄂西南一次早春强对流过程的多源资料分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 174-183.
- [8] 陆飞, 阮蔚琳, 邓雯. 2021年盛夏苏中南一次强冰雹过程大气环境与雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 167-173.
- [9] 李超, 彭小燕, 林应, 等. 一次致灾强冰雹过程分析与高分辨率数值模拟研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2022, 16(2): 23-31.
- [10] 刘贞, 郭鸿鸣, 李飏, 等. 秦皇岛一次飚线冰雹天气分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(4): 100-108.
- [11] 张桂莲, 刘林春, 赵斐, 等. 前倾槽背景下河套地区一次强冰雹天气成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 1-8.
- [12] 程小娟, 马中元, 陈鲍发, 等. 丰城两次雷暴大风特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(1): 59-62.
- [13] 陈丽丽, 马中元, 彭景, 等. 靖安县雷暴大风天气与回波特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(1): 23-27.
- [14] 周明飞, 万雪丽, 罗喜平. 贵州静止锋冷区高架雷暴冰雹特征及其成因[J]. 热带地理, 2017, 37(4): 484-493.
- [15] 杜安妮, 陈阳权. 乌鲁木齐机场1次短时雷雨大风天气特征及成因分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(1): 59-62.
- [16] 郑永光, 宋敏敏. 冷涡影响中国对流性大风与冰雹的分布特征[J]. 热带气象学报, 2021, 37(增刊): 710-720.
- [17] 叶东. 一次强风雹天气的干侵入作用及雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 44-52.
- [18] 周明飞, 杜小玲, 罗敬, 等. 贵州“5.15”极端风雹天气过程的环境场和雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 158-166.
- [19] 罗喜平, 罗雄, 李国平, 等. 中国天眼“FAST”所在地两次大冰雹天气过程的对比分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 78-89.
- [20] 贵州省气象科学研究所. 贵州冰雹的气候分析[J]. 气象科技资料, 1976, 4(3): 3-4.
- [21] 万雪丽, 周明飞, 曾莉萍, 等. 贵州春季强冰雹天气量化概念模型研究及试应用分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(2): 1-7.
- [22] 张小娟, 黄钰, 李皓, 等. 近10 a贵阳市强对流天气的时空分布特征分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 53-55.
- [23] 李力, 万雪丽, 齐大鹏, 等. 贵州省雷暴大风时空分布及对流参数特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(2): 1-8.
- [24] 王芬, 唐浩鹏, 杨帆, 等. 2020年1月24—25日贵州冰雹、雨雪共存天气机理分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(4): 17-25.
- [25] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 410-453.
- [26] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2016: 145-163.