

# 贵州铜仁3.30大范围降雹天气过程分析

兰世敏<sup>1</sup>, 张李娟<sup>2</sup>, 熊引<sup>3</sup>, 龙飞翼<sup>1</sup>, 白阿敏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州省石阡县气象局, 贵州 石阡

<sup>2</sup>贵州省铜仁市气象局, 贵州 铜仁

<sup>3</sup>贵州省安顺市气象局, 贵州 安顺

收稿日期: 2024年4月28日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

本次过程利用常规气象观测、铜仁市多普勒雷达、探空观测和NCEP再分析资料, 研究分析了2021年3月30日下午发生在贵州省铜仁市多个县的一次大范围冰雹强对流天气过程, 探寻铜仁市冰雹强对流天气的预报指标, 借此提高对此类灾害性天气的监测和预警能力。结果表明: 1) 本次强对流天气属于典型的贵州热低压辐合线型, 主要影响系统为500 hPa高空槽, 700 hPa、850 hPa切变线, 低空急流和地面热低压; 2) 大气垂直上升运动强, 地面辐合线的触发, 水汽输送集中在低层, 低层强水汽辐合使降雹区的中低层水汽条件充沛, 有利于强对流的产生; 3) 探空资料的对流有效位能(CAPE)、K指数、沙氏指数(SI)等指示意义较好, 不稳定能量的聚集, 适宜的0°C层、-20°C层高度与较强垂直风切变对冰雹的形成有利; 4) 降雹区垂直累积液态水含量(VIL)集中在40~55 kg·m<sup>-2</sup>之间, 50 dBz以上的强回波顶高在8 km以上, 降雹区最小VIL为27.4 m·s<sup>-1</sup>。

## 关键词

冰雹, 雷达回波, 垂直风切变, VIL

# Analysis of the Widespread Hail Weather Event in Tongren, Guizhou on March 30

Shimin Lan<sup>1</sup>, Lijuan Zhang<sup>2</sup>, Yin Xiong<sup>3</sup>, Feiyi Long<sup>1</sup>, Amin Bai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Meteorological Bureau of Shiqian, Tongren Guizhou

<sup>2</sup>Meteorological Bureau of Tongren, Tongren Guizhou

<sup>3</sup>Meteorological Bureau of Anshun, Anshun Guizhou

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Utilizing conventional meteorological observations, Doppler radar, radiosonde observations, and

文章引用: 兰世敏, 张李娟, 熊引, 龙飞翼, 白阿敏. 贵州铜仁 3.30 大范围降雹天气过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 742-752. DOI: 10.12677/ccrl.2024.133084

NCEP reanalysis data, a comprehensive analysis was conducted of a widespread hailstorm and severe convective weather event that occurred in multiple counties of Tongren City, Guizhou Province on the afternoon of March 30, 2021. The study sought to identify predictive indicators for severe convective weather involving hail in Tongren City, aiming to enhance the monitoring and early warning capabilities for such disastrous weather events. The results indicate: 1) This severe convective weather event was characteristic of a typical Guizhou hot low pressure convergence line type, primarily influenced by a 500 hPa upper-level trough, shear lines at 700 hPa and 850 hPa, a low-level jet and surface thermal low pressure; 2) There was strong vertical atmospheric ascent, with triggering by surface convergence lines, and moisture transport concentrated in the lower atmosphere. Strong low-level moisture convergence in the hailfall area created abundant moisture conditions in the mid and lower levels, conducive to the generation of severe convection; 3) Radiosonde data indicators such as Convective Available Potential Energy (CAPE), K-index, and Showalter Index (SI) were found to be significant, and the accumulation of unstable energy, suitable 0°C level and -20°C level heights, together with strong vertical wind shear, were favorable for hail formation; 4) In the hailfall areas, the vertical integrated liquid (VIL) was concentrated between 40~55 kg·m<sup>-2</sup>, with the strong echo top height of echoes above 50 dBz being over 8 km, and the lowest VIL recorded was 27.4 m·s<sup>-1</sup>.

## Keywords

Hail, Radar Echo, Vertical Wind Shear, VIL

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冰雹常伴随雷雨强风和强降水,是铜仁市的重要灾害性天气之一,往往给生产生活带来严重危害,因此政府部门正在努力提升对冰雹的预测能力,以确保人民生产生活的安全。冰雹灾害是一种中小尺度天气现象,其存在的时间跨度、范围广泛,且受到大气层结构的影响,导致其强弱、持续时间长短不一[1]。近年来,气象工作者得出一些具有指示意义的结论。Bosart [2]研究一个中尺度系统与天气尺度之间的相互影响,发现天气尺度的变化会影响中尺度环流的形成和发展。蒋亚平等[3]指出中层弱短波槽的存在会导致低层急流的产生,而地面锋面的出现则会使前期的高温天气得到充足的能量,而这些能量又会触发强对流天气的形成。许弋等[4]指出,降雹云团的尺度小、形状不规则,强对流云团是冰雹云的主体。此外,也有研究发现垂直累积液态水含量(VIL)对冰雹的存在有着较好的指示作用,回波强度、回波顶高、冰雹指数、VIL等是对判别冰雹云有较高应用价值的特征指数[5]。以上研究揭示强对流天气发生发展的成因和特点,提高工作中对强对流天气监测、预报的能力。本文利用常规气象观测、多普勒雷达、探空观测以及NCEP再分析资料,对2021年3月30日铜仁市出现的大范围降雹天气过程,从高空环流形势、探空资料、雷达回波几个方面进行综合分析,有助于更好地掌握冰雹变化趋势,并有效地指导铜仁市的防御措施。

## 2. 冰雹分布及环流形势

### 2.1. 降雹实况

2021年3月30日13:50至17:30(北京时,下同),贵州省铜仁市印江县、江口县、石阡县、思南县、

沿河县、德江县及碧江区 7 个区县出现雷电、冰雹和短时强降水等强对流天气(图 1)。据各县受灾情况统计,此次石阡县多个乡镇的粮食作物、经济作物等造成了严重灾害,直接经济损失达 7000 多万元,给人民群众生产生活造成重大损失。铜仁市多个乡镇出现了直径 3~40 mm 的冰雹,江口县民和乡凯里村的最大冰雹直径达 40 mm。在十几分钟内,上述区县出现中到大雨,最大小时雨强达 27.4 mm。

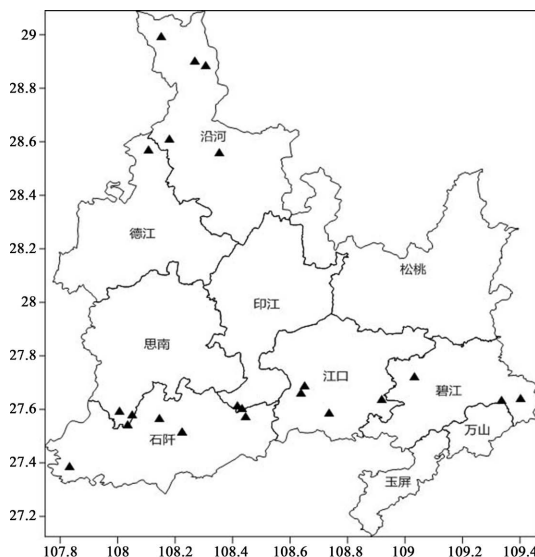


Figure 1. Hailfall area on 30 March, 2021 in Tongren of Guizhou (▲for hail area)

图 1. 2021 年 3 月 30 日贵州省铜仁市冰雹落区(▲为冰雹区)

## 2.2. 环流形势分析

冰雹的形成机制有许多复杂的理论,在环流形势场上有对应的天气系统影响,如低涡、锋面、高低空急流、切变线等。2021 年 3 月 30 日 08:00 天气系统配置图上(图 2),500 hpa,上游槽线在云南;08:00,700 hpa 高度场,铜仁处于偏西到西南气流控制,存在低空急流,辐合上升运动明显,切变线出现在川东—重庆北;850 hPa 切变线在湖南北部,西南急流输送,不同层结急流配合有利于形成垂直上升运动;地面受热低压控制,前期积累的能量,为强对流天气的触发提供基础。

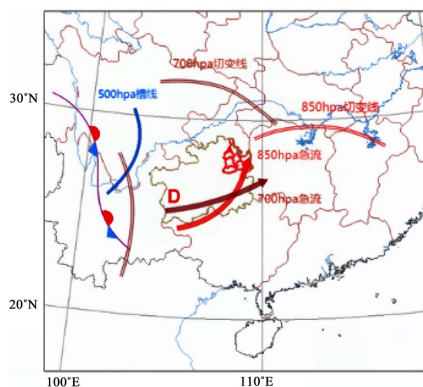


Figure 2. Weather system configuration at 08:00 on March 30, 2021

图 2. 2021 年 3 月 30 日 08:00 天气系统配置图

### 3. 探空资料分析

#### 3.1. 特性高度与垂直风分析

大范围的降雹是一个复杂的物理过程,出现在特定的时间和地区,需要满足一定的环境条件。由2021年3月30日08:00湖南(怀化)站T与Td订正探空(图3)可知,抬升凝结高度(LCL)为500.7 m,自由对流高度(LFC)为4763.8 m,0°C层高度为4427.0 m,-20°C层高度为7677.2 m。一般情况下适当的0°C层高度和-20°C层高度,是冰雹生成的“雹源区”[6]。从0°C层高度和-20°C层高度可以分析当日适中条件有利于冰雹天气的出现。

垂直风切变的存在极大程度影响着风暴的发展。切变环境能够使上升气流倾斜,使得上升气流中形成的降水质点脱离上升气流,而不会因拖带作用减弱上升气流的浮力;垂直风切变可以增强中层干冷空气的吸入,加强风暴中的下沉气流和低层冷空气外流;通过强迫抬升作用让流入的暖湿气流更加强烈地上升,从而加强对流[7]。冰雹发生前,925 hPa为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的弱东北风,850 hPa转为 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏南风,到700 hPa为 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风,400 hPa风速达到 $42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风速由近地面的 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增加到500 hPa的 $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风速差近 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风速随高度升高增加,风向随高度升高也有一定程度的顺转,中低层垂直风切变较强,有利于强风暴的发生、发展和维持。

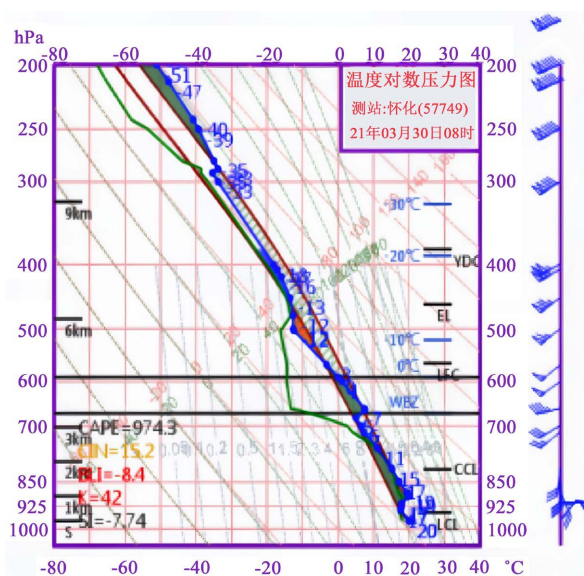


Figure 3. The T and TD correction radiosonde of Hunan (Huaihua) station at 08:00 on March 30, 2021

图3. 2021年3月30日08:00湖南怀化站T与TD订正探空

#### 3.2. 稳定度分析

实际工作中,预报员利用天气学概念模型结合对流参数制作强对流天气潜势预报,对探空资料进行分析时,主要依据K指数、沙氏指数(SI)、对流有效位能(CAPE)等数值。沙氏指数(SI)是判断大气稳定度的一种判据,大气不稳定,负值越大,不稳定程度也越大,大气稳定,正值越大,稳定程度也越大;K指数可以反映大气层结稳定情况,K指数越大,层结越不稳定[8];对流有效位能(CAPE)是气块在给定环境中绝热上升时的正浮力所产生的能量垂直积分,是衡量风暴潜在强度的一个重要指标[9]。 $SI = -7.74^\circ\text{C} < 0^\circ\text{C}$ 表示气层不稳定,有雷暴发生的可能性;K指数 =  $42^\circ\text{C}$ ,说明存在较大的热力不稳定能量;从能量

条件看, 08:00 怀化探空订正后的  $CAPE$  已经达到  $974.3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 能量的聚集使对流过程强烈发展, 为之后的降雹天气提供能量基础(表 1)。

**Table 1.** The thermal instability indexes at Huaihua radiosonde station of Hunan at 08:00 BST on 30 March 2021  
**表 1.** 2021 年 3 月 30 日 08:00 湖南怀化探空站的各项热力不稳定指数

时间	$K/^\circ\text{C}$	$SI/^\circ\text{C}$	$CAPE/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0^\circ\text{C}$ 层高度/m	$-20^\circ\text{C}$ 层高度/m
08:00	42.0	-7.74	974.3	4427.0	7677.2

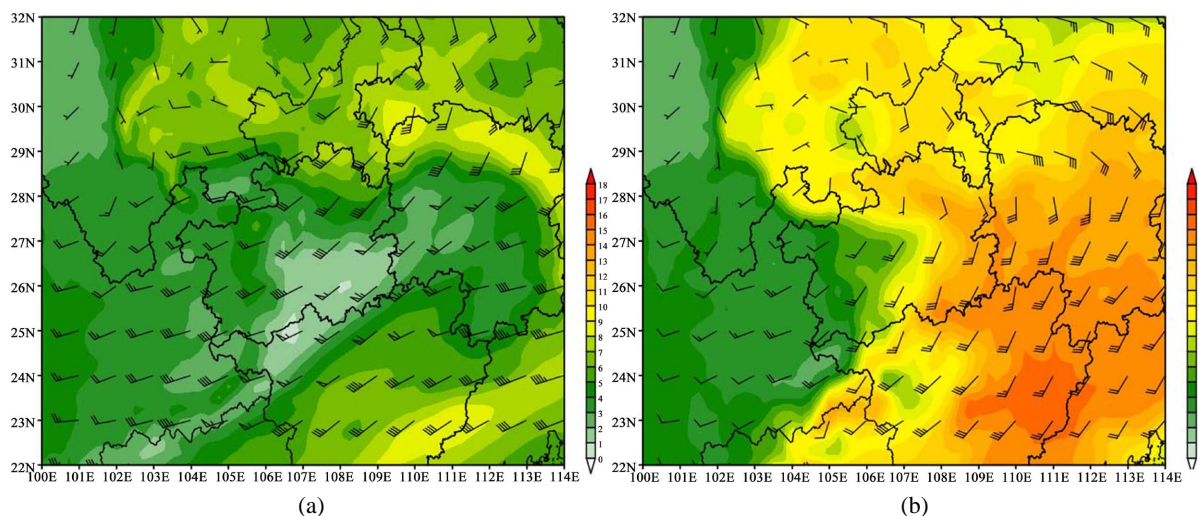
#### 4. 水汽条件分析

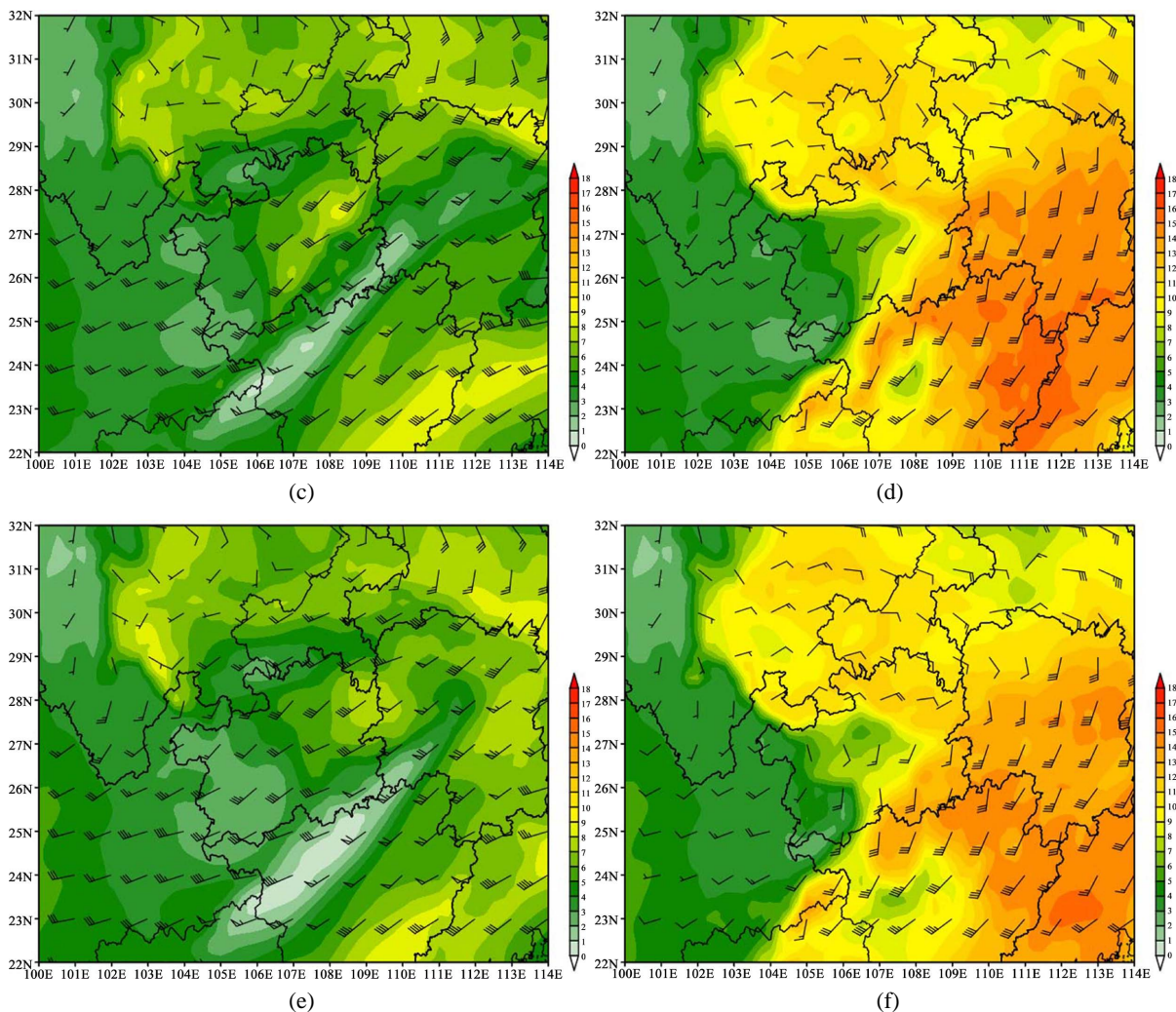
水汽条件是强对流天气形成的基本要素之一[10], 强对流天气的产生需要有一定的水汽条件配合; 相对于其他表示湿度的要素, 比湿可以更好地表现出大气的绝对湿度分布[11]。下图为 30 日铜仁上空 13 时、16 时、18 时 700 hpa、850 hpa 比湿和风向、风速叠加情况(图 4)。分析 700 hpa 比湿和风向、风速叠加情况, 13 时开始, 水汽由西南风源源不断地输送到铜仁上空, 铜仁处在急流的左前端, 西南急流最强达到  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  或以上, 地面强对流天气开始出现。从图中看出, 冰雹发生前, 南北有绝对湿度较大的高湿中心, 中心值约为  $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。16 时北部比湿中心向冰雹发生区伸出一狭窄的湿舌, 湿舌在供应水汽和建立不稳定层结中有重要作用, 所以可以将低空湿舌的存在作为风暴发展的一个必要条件[12], 表明铜仁市上空水汽含量逐渐增强。18 时水汽输送出现减弱, 铜仁市强对流天气也逐渐停止。

分析 850 hpa 比湿和风向、风速叠加情况, 13 时铜仁位于低空急流左侧的强气旋式性切变区, 铜仁西一东部开始出现冰雹、大风等强对流天气; 13 至 16 时随着强对流天气的发展, 铜仁市东部的比湿中心具有加强的趋势, 达  $13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 对流层低层具有强烈的水汽辐合; 18 时湿度减弱, 强对流天气趋于停止。由此可见, 低层空气的较高水汽含量有利于强对流天气的发生发展, 低层水汽的辐合作用是强对流天气发生的条件之一。

#### 5. 动力条件分析

大气垂直运动是天气分析中必须考虑的一个物理量, 层结中的不稳定能量需要一定上升运动才能释放出来, 大气中的能量转换主要是靠垂直运动实现的, 从而形成对流性天气[8]。地面辐合线或干线是触发强对流天气的因子之一, 对流单体一般生成于地面辐合线附近, 在地面辐合线与干线结合处易于对流





**Figure 4.** Superposition diagram of specific humidity (unit:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), wind direction and wind speed (arrow, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of 700 hpa and 850 hpa at 13:00, 16:00 and 18:00 on March 30, 2021

**图 4.** 2021 年 3 月 30 日 700 hpa、850 hpa 13 时、16 时、18 时比湿(单位:  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和风向、风速(箭矢, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )叠加图

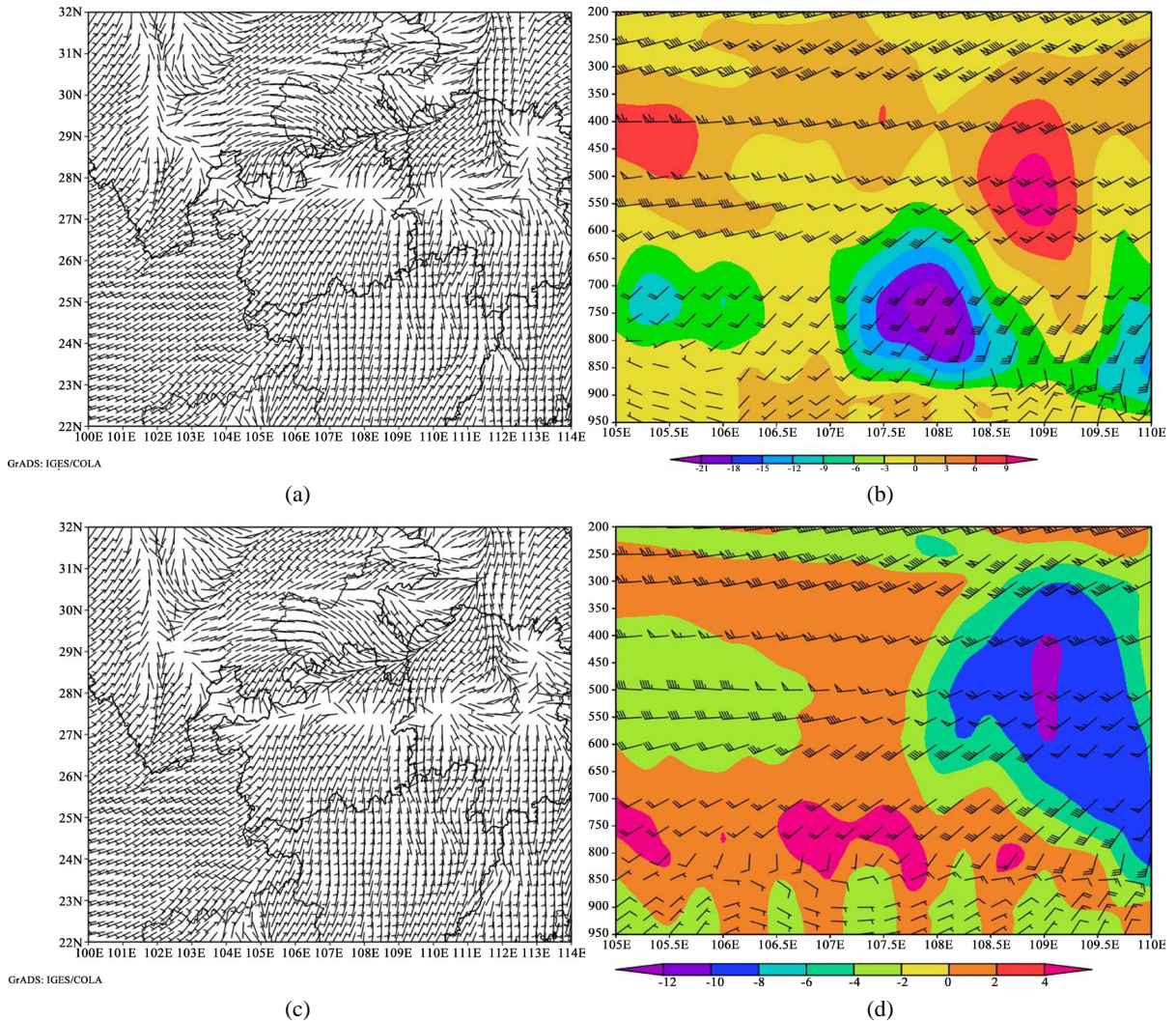
单体或云团的新生和发展[13]。分析铜仁上空的垂直运动, 沿冰雹发生区域  $27.5^{\circ}\text{N}$  做垂直速度的垂直剖面(图 5), 15 时铜仁境内( $108\sim 108.5^{\circ}\text{E}$ ), 在  $750\sim 850$  hPa 附近形成了一个强的上升运动中心, 上升速度达到了  $-21\cdot 10^{-1} \text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 铜仁市近地面为东北风或偏东风, 与南部的东南风形成中尺度辐合线,  $10 \text{ m}$  风场的辐合线处于  $28^{\circ}\text{N}$ ,  $107\sim 109^{\circ}\text{E}$  附近, 地面的强对流运动开始发生。16 时沿冰雹发生区域  $28.6^{\circ}\text{N}$  做垂直速度的垂直剖面(图 5),  $108\sim 110^{\circ}\text{E}$  区域内上升运动从  $900$  hPa 一直延续到  $250$  hPa, 垂直伸展高度高, 区域跨度大, 垂直速度中心数值超过  $-12\cdot 10^{-1} \text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ , 地面辐合线依然维持。15 时和 16 时在铜仁境内的垂直上升运动非常强盛, 地面辐合线的长时间维持有利于强对流天气的产生。

## 6. 雷达回波分析

### 6.1. 雷达回波特征

全国各地对强对流天气的研究表明, 强对流天气的雷达回波特征为强度较强、回波顶较高, 冰雹云

回波在 PPI 图上常呈现块状、带状和絮状 3 种形态[14]。PPI 图上有钩状回波、弓形回波、列车效应及 RHI 图上的有弱回波区(WER)或有界弱回波区(BWER)、悬垂回波等显著特征[15]。



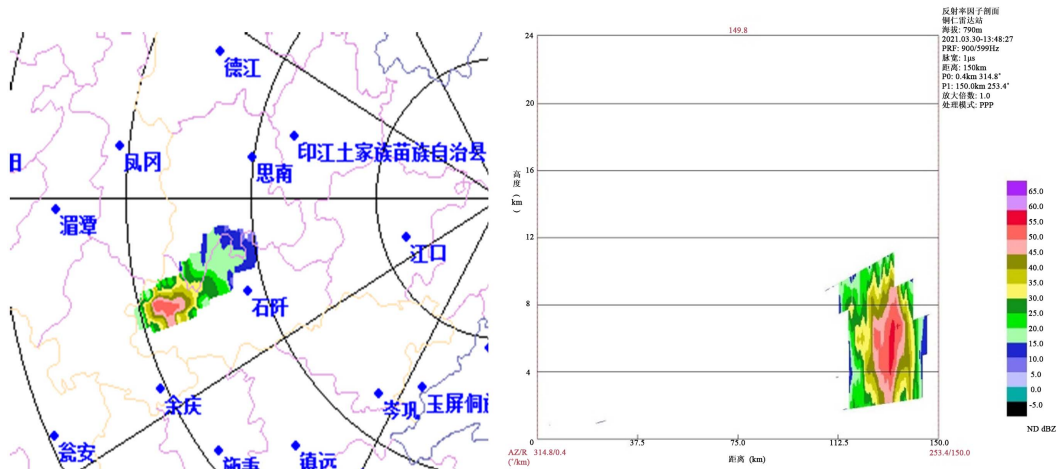
**Figure 5.** Longitude-height profile (unit:  $10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of vertical velocity along  $27.5^{\circ}\text{N}$  at 15:00 and  $28.6^{\circ}\text{N}$  at 16:00 and wind field diagram of 10 m at 15:00 and 16:00 on March 30, 2021 (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 5.** 2021 年 3 月 30 日 15 时沿  $27.5^{\circ}\text{N}$ 、16 时沿  $28.6^{\circ}\text{N}$  做垂直速度的经度—高度剖面(单位:  $10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )及 15 时、16 时 10 m 风场图(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

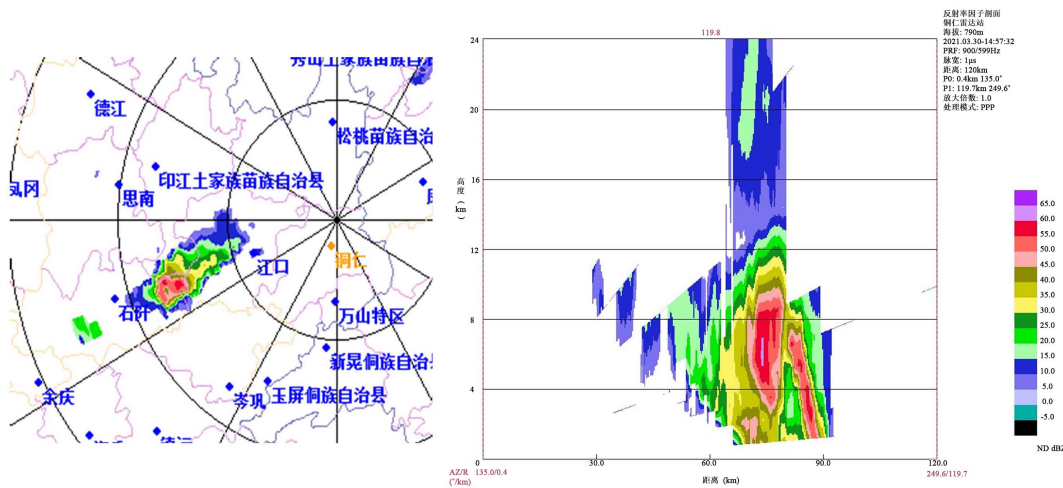
3 月 30 日 13:08, 遵义市余庆县境内南部回波迅速发展, 面积增大并自西向东移动, 强度不断增强。13:31 进入石阡境内的单体回波中心值达 57 dBz, 受其影响, 石阡境内出现降雹, 13:48 分(图 6(a))中心最大强度达 61 dBz。14:57 分(图 6(b)), 回波中心存在 V 型缺口, 表明有强的入流气流进入上升气流, 相应雷达回波强度达到 62.5 dBz, 50 dBz 回波顶高为 9.4 km。回波持续向东移动, 影响南部区县(思南、印江、江口、碧江), 16:46 分从碧江区移出我市。

3 月 30 日 16:06, 两块对流单体分别初生于重庆和遵义务川境内, 16:30 分自西向东不断发展进入我市沿河县, 16:52 分进入我市德江县; 17:15 分(图 6(c))德江境内的单体回波中心值最强达 62 dBz, 50 dBz 回波顶高达 9.6 km, 有冰雹降落, 直径为 15 mm, 伴有雷电和短时强降水; 17:21 分(图 6(d))沿河境内回

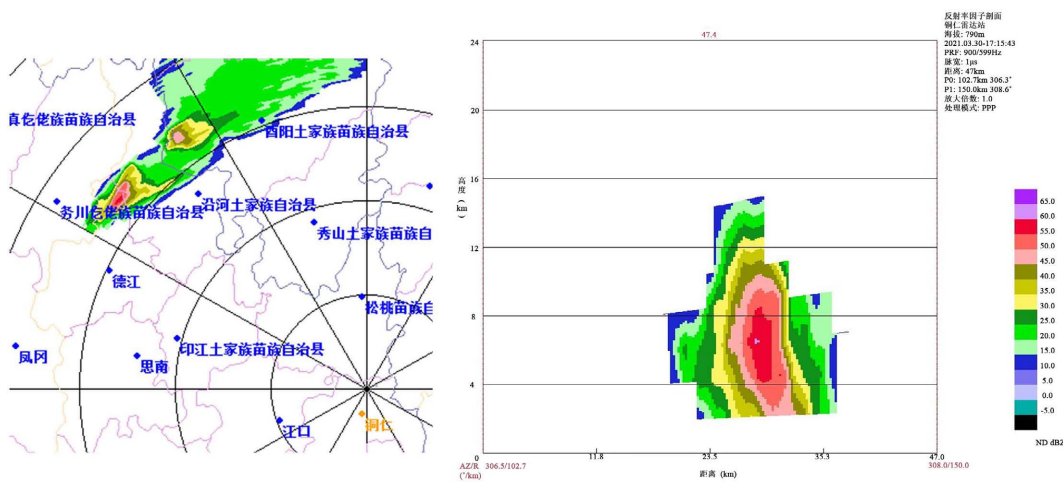
波中心最大强度达 60 dBz, 50 dBz 回波顶高达 10.5 km, 有 30 mm 的大冰雹降落。两块强对流单体连成片在东移过程中使沿河、德江发生降雹天气, 影响两县多个乡镇, 18:47 分移出我市。



(a) 13:48



(b) 14:57



(c) 17:15



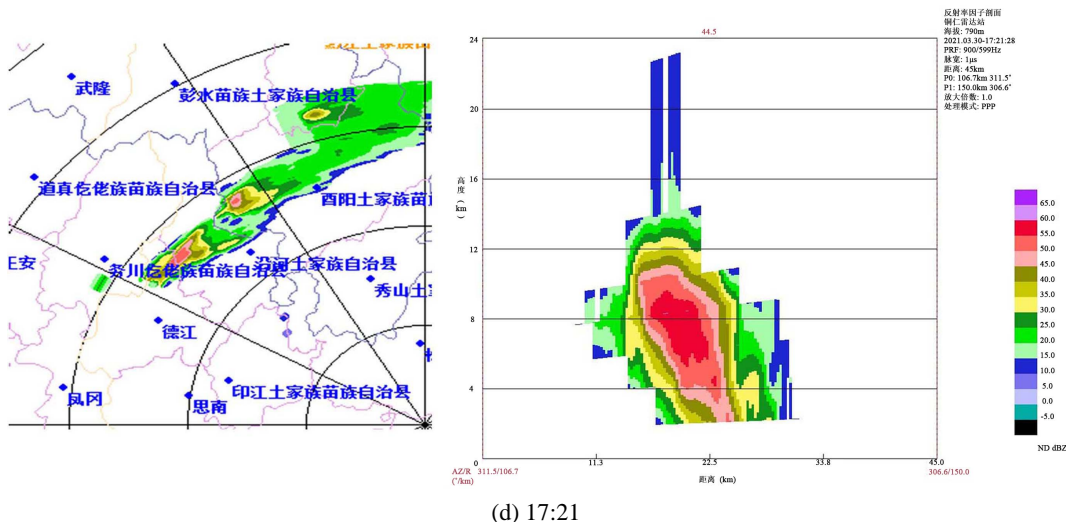


Figure 6. The profile of radar echo and radar echo in Tongren on March 30, 2021  
 图 6. 2021 年 3 月 30 日铜仁市雷达回波及雷达回波剖面图

### 6.2. 降雹区 VIL 及强回波顶高特征

表 2 为各乡镇(从西向东按冰雹先后影响时间排列)降雹区域的垂直累积液态含水(VIL)及对应的 50 dBz 以上强回波顶高。多普勒天气雷达提供的 VIL 可以显示风暴的水汽含量, 且可判断对流系统的强度与大冰雹出现的概率; 50 dBZ 的回波顶高对强对流活动的出现发展有着较好的指示意义。由表 2 可知, 3 月 30 日铜仁市强对流单体降雹过程中, 降雹区的 VIL 普遍在 40~55 kg·m<sup>-2</sup>之间, 石阡乡降雹区最大 VIL 达到 71.7 kg·m<sup>-2</sup>; 各乡镇降雹区 50 dBz 以上强回波顶高普遍在 8 km 以上, 沿河中寨乡最大 50 dBz 以上强回波顶高达到 10.5 km。

VIL 是判别强降水及其降水潜力、强对流天气造成的暴雨、暴雪和冰雹等灾害性天气的有效工具之一, 具以往的研究认为 VIL ≥ 40 kg·m<sup>-2</sup>时一般会产生冰雹天气[16]。但从此次 VIL 统计结果来看, 此观点并不适用于贵州地区, 由于地形等原因, 贵州冰雹研究结果认为产生冰雹的 VIL 临界值可能会小于 40 [17], 此次过程降雹区最小 VIL 为 27.4 kg·m<sup>-2</sup>。VIL 值的跃增可以反映冰雹粒子在生长区碰并增长的事实, 其水汽来自低层的向上输送, 说明雹云已处于酝酿之中[18]。VIL 值开始从 34.7 kg·m<sup>-2</sup>增至 71.7 kg·m<sup>-2</sup>, 表明雹云随着时间的发展, VIL 也在增长。这些指标对短临预报预警及人影防雹作业具有一定参考价值。

Table 2. VIL and top height of strong echo with more than 50 dBz in hailfall points of Tongren on 30 March, 2021

表 2. 2021 年 3 月 30 日铜仁区域降雹点的 VIL 及 50 dBz 以上强回波顶高

时间	降雹点	VIL/kg·m <sup>-2</sup>	50 dBz 以上回波顶高/km
30 日	石阡河坝	34.7	8.3
	石阡石固	71.7	9.0
	石阡白沙	40.9	9.0
	石阡龙井	40.3	8.4
	石阡县城	42.7	9.2
	思南上坝	41.3	9.6

续表

	思南竹山	41.8	8.7
	思南联盟	41.8	8.7
	印江坪林	34.1	8.2
	王家坡	54.9	9.4
	江口罗江	47.8	8.0
	江口红石	42.9	8.3
	江口凯里	53.9	10.2
	江口张屯	53.3	9.1
30 日	碧江坝黄	46.4	8.0
	碧江瓦屋	44.2	9.8
	六龙山	44.2	9.8
	沿河垢平	51.5	10.0
	沿河客田	27.4	7.6
	沿河新景	51.5	10.0
	沿河中寨	42.6	10.5
	沿河官舟	47.8	10.4
	德江泉口	36.1	9.6

## 7. 结论

1) 本次冰雹天气属于典型的贵州热低压辐合线型，主要影响系统为高空槽、低层切变线、低空急流和地面热低压。

2) 在冰雹出现前受热低压影响，存储了不稳定能量；对流层不稳定；低层强水汽输送使降雹区的中低层水汽条件充沛；垂直上升运动强与地面辐合线的触发，有利于强对流的产生。

3) 冰雹出现前，订正后 CAPE 达  $974.3 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，SI 指数为  $-7.74^\circ\text{C}$ ， $0^\circ\text{C}$  层和  $-20^\circ\text{C}$  层分别在 4 km 和 7 km 左右，整个冰雹过程铜仁区域垂直风切变较大，达  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上。

4) 冰雹过程生成和消失时间迅速，危害大。在回波云中存在 60 dBz 以上的回波单体，冰雹在生成和发展阶段，回波强度、回波顶高、垂直累积液态水含量等指标跃增；降雹点  $> 50 \text{ dBz}$  的强回波顶高在 8 km 以上，VIL 在  $27.4\sim 71.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  之间，这些在未来的预报工作中可作为铜仁区域冰雹发生的指标。

## 基金项目

贵州省气象局科研业务项目(黔气登科[2022] 11-11 号)：石阡县春季冰雹时空分布特征及雷达回波指标分析。

## 参考文献

- [1] 杨敏, 丁建芳. 河南省冰雹时空分布及天气形势特征[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 54-60.
- [2] Bosart, L.F. (1984) The Texas Coastal Rainstorm of 17-21 September-1979: An Example of Synoptic Mesoscale Interaction. *Monthly Weather Review*, **112**, 1108-1133.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1108:TTCROS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1108:TTCROS>2.0.CO;2)

- [3] 蒋亚平, 张玲玲, 奉意杰, 苏彦, 卓健. 2018年4月桂西南一次冰雹天气过程诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(1): 40-47.
- [4] 许弋, 周丽娜, 张萍. 贵州春季冰雹天气过程个例分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(S1): 35-39.
- [5] 陈红梅, 刘洪良. 2020年“3·24”重庆城区冰雹天气形成原因与雷达回波演变特征[J]. 农技服务, 2020, 37(8): 79-81+84.
- [6] 张红梅, 陈颖, 邓丽萍. 2011年龙岩市北部两次冰雹过程分析[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(S2): 31-33+43.
- [7] 刘杰, 汤洁, 查怀华, 何悦, 陈翔. 淮南市一次初春冰雹过程分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 429-432.
- [8] 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: 623-624, 639.
- [9] 肖湘卉, 武麦凤, 王旭仙, 曹慧萍. 两次强对流天气的热力不稳定条件对比分析[J]. 陕西气象, 2012(2): 17-22.
- [10] 魏勇, 彭军, 热苏力·阿不拉, 王存亮, 陈建民. 新疆天山北坡中部一次冰雹天气成因分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 771-777+802.
- [11] 王晓玲, 龙利民, 王珊珊. 一次春季冰雹过程的成因分析[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(2): 160-165.
- [12] 闵晶晶, 刘还珠, 曹晓钟, 王式功. 天津“6.25”大冰雹过程的中尺度特征及成因[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5): 525-536.
- [13] 许新田, 刘瑞芳, 郭大梅, 李萍云, 侯建忠, 陶建玲. 陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析[J]. 气象, 2012, 38(5): 533-542.
- [14] 王秀琴, 刘辉. 冰雹云的雷达回波结构特征分析[J]. 新疆农垦科技, 2021, 44(1): 43-45.
- [15] 马素艳, 斯琴. 内蒙古河套地区短时强降水和冰雹的雷达回波特征分析[C]//中国气象学会. 第33届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 2016: 10.
- [16] 黄炎, 邵玲玲, 葛张全. WSR-88D多普勒天气雷达的运行设计和使用情况分析[J]. 气象, 1999(5): 14-19.
- [17] 周永水, 周明飞, 原野. 多普勒雷达产品在贵州山区的降雹特征[J]. 贵州气象, 2012, 36(1): 40-43.
- [18] 郭艳, 应冬梅, 刘冬梅. 江西“4·12”降雹过程的多普勒雷达资料分析[J]. 气象, 2005(11): 48-52+98.