

向淑君,周筠珺,邹书平,等,2022. 黔西山区小槽触发类雹暴的诊断方法研究[J]. 气象,48(2):203-215. Xiang S J, Zhou Y J, Zou S P, et al, 2022. Diagnostic method analysis of hailstorm triggered by low-trough in western Guizhou Mountain Area[J]. Meteor Mon, 48(2):203-215(in Chinese).

黔西山区小槽触发类雹暴的诊断方法研究^{*}

向淑君^{1,2} 周筠珺^{1,3} 邹书平⁴ 杨 哲⁴ 曾 勇⁴

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 贵州省气候中心, 贵阳 550002

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 贵州省人工影响天气办公室, 贵阳 550081

提 要: 利用探空资料、美国国家环境预报中心 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 逐 6 小时再分析资料、X 波段双偏振雷达观测资料对小槽触发的雹暴过程进行诊断分析。针对其发生发展特征, 提炼出具有代表性的预报指标阈值构建针对小槽触发的雹暴诊断方法。利用此方法对雹暴多发地黔西山区, 小槽触发下 3 次雹暴过程进行诊断分析, 验证诊断方法对各类小槽触发的雹暴过程的预报效果。结果表明: 根据多个个例降雹前的环境条件特征, 选取湿热力垂直螺旋度大于 $0.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 和水汽垂直螺旋度大于 $0.8 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ 作为指标阈值, 在雹暴发展初期可诊断出个例的降雹潜势; 针对强风切变、单体合并过程将促进强雹暴发展的特性, 利用热力切变平流参数绝对值大于 $3 \times 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大值中心区域与降雹地的对应关系和 45 dBz 回波顶高与 0°C 高度关系阈值, 可诊断雹暴单体发展成强雹暴的可能性; 利用以上方法对 3 个降雹过程诊断检验时, 此方法能系统全面地诊断出降雹潜势和强雹暴过程。

关键词: 雹暴, 对流参数, 雷达回波, 诊断方法, 湿热力垂直螺旋度

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.061301

Diagnostic Method Analysis of Hailstorm Triggered by Low-Trough in Western Guizhou Mountain Area

XIANG Shujun^{1,2} ZHOU Yunjun^{1,3} ZOU Shuping⁴ YANG Zhe⁴ ZENG Yong⁴

1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Guizhou Climate Centre, Guiyang 550002

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081

Abstract: This paper uses sounding data, NCEP reanalysis data and observation data of X-band dual-polarization radar to analyze the hailstorms triggered by small troughs. According to the features of occurrence and development and the predictive indexes with good indicative significance to the hailstorm triggered by small trough, a diagnosis method is constructed. By the method, three hailstorms with different intensities triggered by small trough are diagnosed, and the prediction effects are verified. The results indicate that the hailstorm potential of individual cases can be diagnosed effectively by the thresholds of the vertical

^{*} 国家自然科学基金项目(41875169)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104)、国家重点研发计划(2018YFC1505702)、贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2019]2387号)和四川省教育厅项目(16CZ0021)共同资助

2020 年 11 月 17 日收稿; 2021 年 9 月 13 日收修定稿

第一作者: 向淑君, 主要从事中小尺度灾害性天气及其短临预报研究. E-mail: 1379051265@qq.com

通讯作者: 周筠珺, 主要从事大气物理学与大气环境. E-mail: zhoyuj@cuit.edu.cn

helicity of humid heat force greater than $0.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ and the vertical helicity of water vapor greater than $0.8 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ in the initial stage of hailstone development. Strong wind shear and cell merging processes promote the occurrence and development of hailstorm. In view of this feature, the probability of hailstorm cell developing into severe hailstorm can be diagnosed by using the correspondence between the large value center with the absolute value of thermo shear advection parameter greater than $3 \times 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and the threshold value of the relation between 45 dBz echo top height and 0°C height. Finally, it is verified that this method can diagnose the hailfall potential and severe hailstorm process comprehensively.

Key words: hailstorm, convection parameter, radar echo, diagnostic method, vertical helicity of humid heat force

引言

雹暴是常见的灾害天气之一,常对农作物造成危害,严重时还会影响人们的生活、危及生命财产安全;对于雹暴的研究一直是贵州灾害天气研究的热点。国内学者对我国各区域多次雹暴过程进行环境条件分析,发现不同环流背景下雹暴过程的触发维持机制、对流结构特征不同(冯晋勤等,2017;苏永玲等,2018;公衍铎等,2019;张小娟等,2019)。边界层辐合线、地形、海陆分布、重力波等中小尺度天气系统都是对流活动的触发抬升机制(侯淑梅等,2018b;张桂莲等,2018)。雹暴自组织建立的正反馈机制、干冷空气入侵、垂直风切变、高低空急流的耦合都是维持对流持续发展的重要条件(陈关清等,2016;王迪等,2020)。基于对雹暴单体的对流结构特征分析,发现对流单体之间的相互作用将会促进雹暴单体进一步发展、变化(傅佩玲等,2018;罗辉等,2020)。单体合并后,上游单体可促进下游单体上升运动使得新旧单体迭代,也是促进对流系统增长持久的重要因素(侯淑梅等,2018a;易笑园等,2017)。Doswell III et al(1996)提出可根据环境条件要素进行预报,主要以天气形势结合不稳定、水汽、抬升条件的环境场诊断分析对强对流天气进行潜势预报。美国风暴预报中心通过对各种对流参数进行统计分析,总结各类强对流天气中的指示参数分布特征,并确定判断强对流天气类型的阈值(Weisman and Rotunno,2000)。国内学者根据水汽、热力和不稳定条件相关物理量差异,总结出了对冰雹发生具有良好指示意义的指标(曹艳察等,2018)。周永水等(2013)针对贵州春季冰雹选取相

关对流参数作为预报因子用指标叠加法得到较高预报准确率。利用雷达回波诊断分析雹暴过程时,主要利用粒子的相态识别(Kumjian et al,2016)、降水量估测等(Brandes et al,2003)分析了解雹暴发展过程特征,利用相关雷达参数特征分析雹云动力结构(Snyder et al,2015)。通过对不同强对流单体的分析发现对于不同地域环境下强对流单体回波特征存在一定差异(方翀等,2017;赵庆云等,2017;冯晋勤等,2018)。刘小艳等(2017)基于安顺冰雹的回波特征总结了一些能有效指导防雷工作的识别指标。除此之外,国外学者 Donavon and Jungbluth(2007)使用 50 dBz 回波高度和融化层高度(MLT)作为美国强雹暴的预警指标之一。樊鹏(1994)利用45 dBz 强回波中心高度与 0°C 层的高度差作为山西雷暴的预警标准。

以上研究针对不同环境背景下的雹暴过程发展特征选取了有指示意义的环境物理量阈值或回波特征参数用于雹暴预报预警。对贵州雹暴多发区域的诊断研究中,多是提炼单一、普适性的环境物理量进行诊断分析,对各类型的雹暴诊断正确率不高,具有较高的漏报率。在雹暴预报中缺乏针对不同强度雹暴过程的更加全面的诊断方法。黔西地区雹暴过程中,小槽触发系统是其典型触发机制。可针对其发生发展特征选取不同类型的预报指标诊断个例降雹潜势与强雹暴过程,构建具有针对性的小槽触发的雹暴诊断方法,为雹暴的短期预报提供一定参考。

1 资料与方法

本文选取黔西地区 2018—2019 年发生的具有详细记录的 19 个雹暴日进行研究分析,利用降雹地

附近威宁站的常规观测资料、探空资料、NECP($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)逐 6 h 再分析资料,根据模糊逻辑算法、自适应衰减订正法等对 X 波段双偏振雷达观测资料进行处理分析后,运用 NCL、MATLAB 等软件进行数据处理与分析。以此研究小槽触发雹暴过程的各尺度特征,了解其发生发展机制;根据其发展特性提炼出针对小槽触发雹暴过程的多个物理量阈值与回波特征阈值用于雹暴预报预警。

通过研究分析黔西地区雹暴发展的各尺度特征,根据其环境条件特征等提取预报指标,利用多指标阈值识别预警方法,在雹暴发展初期初步诊断出具有降雹潜势的个例。基于强雹暴发展过程中强风切变、单体合并影响,选取相关物理量阈值,诊断具有降雹潜势个例发展成强雹暴过程的可能性。同时,以 3 个个例检测该诊断方法的实用性。

2 雹暴天气概况

受局地气候、特殊地形地貌等影响,黔西山区是我国西南地区的雹暴灾害多发区。威宁是黔西地区的降雹重点区域,位于贵州西北部低纬高海拔山区,地处云贵高原东部地区乌蒙山脉,北临四川盆地,西北方为青藏高原。威宁处于特殊地形地势下,平均海拔达 2 200 m。其位置为 $26^{\circ}30' \sim 27^{\circ}25'N$ 、 $103^{\circ}36' \sim 104^{\circ}45'E$ 。威宁地区冰雹发生发展过程具有一定的代表性和典型性,其中小槽触发过程为典型背景条件,这些小槽多位于云贵川等地区。

本文利用表 1 中 19 个个例(小槽触发雹暴过程)中的 2018 年 3 月 12 日、2018 年 4 月 17 日、2019 年 6 月 11 日共 3 次雹暴过程作为示例,展示以其余 16 个雹暴过程特征总结而得的小槽触发雹暴诊断方法。2018 年 3 月 12 日为一次飑线过程,17:45—17:55 威宁县幺站镇发生短时强降雨雹,降雹密度为 $700 \sim 1000 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$ 。2018 年 4 月 17 日 17:05—17:10 威宁县云贵乡发生多单体降雹过程,降雹密度为 $300 \sim 500 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$ 。2019 年 6 月 11 日 15:20—15:25 威宁县城发生单体降雹过程,降雹密度较小($20 \text{ 粒} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右)。这 3 次过程中,冰雹平均直径均达到 10 mm。

表 1 19 个雹暴个例基本情况

Table 1 Basic information of 19 hailstorm cases		
降雹时间	降雹地点	密度/(粒·m ⁻²)
2018 年 3 月 12 日	幺站镇	700~1 000
2018 年 3 月 13 日	金钟镇、龙场镇	100~200, 800~1 000
2018 年 3 月 14 日	中寨村	300
2018 年 3 月 23 日	幺站镇	30~40
2018 年 3 月 30 日	炉山镇	100
2018 年 4 月 2 日	炉山镇	10
2018 年 4 月 17 日	云贵乡	300~500
2018 年 4 月 18 日	县城内	100
2018 年 4 月 28 日	金钟镇	10
2018 年 4 月 30 日	兔街乡	150
2018 年 5 月 7 日	牛棚镇	50~60
2018 年 5 月 8 日	幺站镇	600
2018 年 5 月 17 日	小海镇	10
2018 年 5 月 18 日	双龙镇	30
2018 年 5 月 20 日	嘎基村	40
2019 年 4 月 11 日	汤郎村	30~40
2019 年 4 月 27 日	嘎基村、羊街镇	200
2019 年 6 月 11 日	城关村	20
2019 年 6 月 14 日	秀水镇	50

3 雹暴的触发及相关物理量参数

小槽触发的雹暴过程都具有相似的环境场特征。通过分析触发雹暴过程的环境场特征,提取与中尺度触发维持系统相关且具有指示意义的环境物理量进行降雹趋势分析。从小槽触发下热力、动力条件显著这一特征着手,选取能体现热力、动力和水汽特征的相关物理量诊断个例降雹潜势。

3.1 触发雹暴的环境条件特征

小槽触发的雹暴过程中环流形势多具有相似的特征。高空冷涡和高空脊等大尺度系统的稳定存在,使得不断有小槽东移,并引导极地冷空气沿平直西风带向我国输送促进小槽发展,东移至云贵川等地区的小槽触发降雹过程(图 1a~1c)。槽后冷空气促进高空干冷空气与低层暖湿空气交汇有利于切变线的生成。切变线与地面干线、辐合线触发低层对流产生,加强对流运动垂直发展(图 1d~1f)。天气尺度小槽既依赖于大尺度环流的稳定发展,又促进着中尺度触发系统的发生发展。在稳定的大尺度环流系统和天气尺度小槽影响下,其雹暴过程都具有中低层热力、动力条件显著的特征,并且水汽、抬升条件也是主要在中低层发展。如图 2 所示降雹地

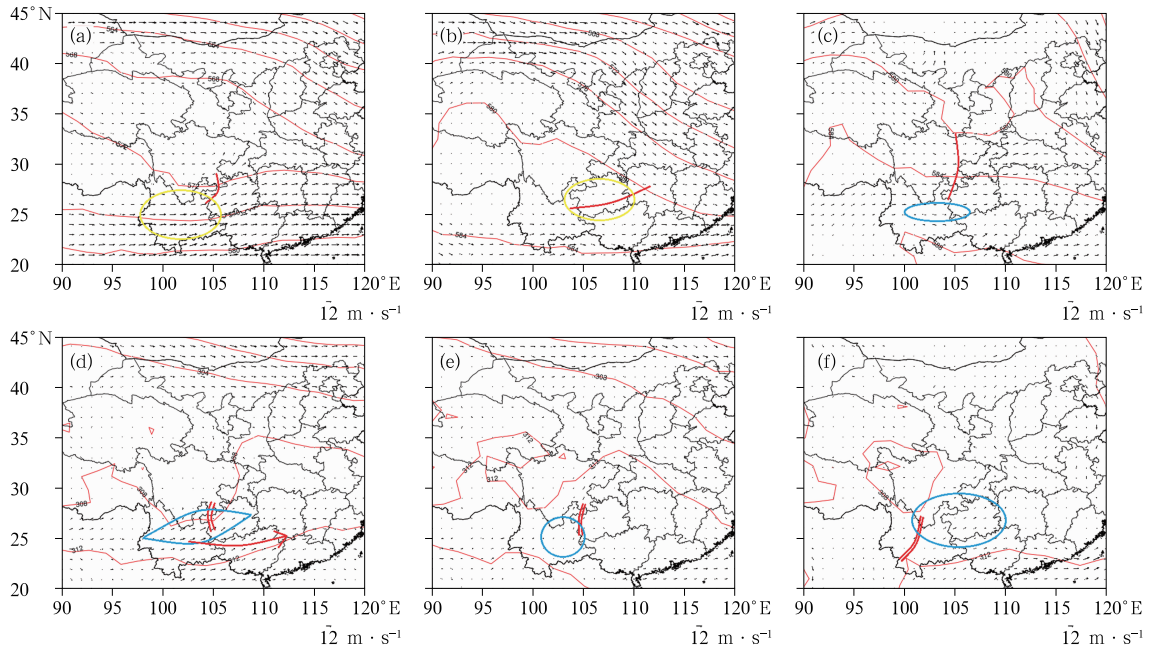


图 1 (a,d)2018 年 3 月 12 日、(b,e)2018 年 4 月 17 日、(c,f)2019 年 6 月 11 日 (a,b,c)500 hPa 和 (d,e,f)700 hPa 天气分析图

(红色线为等高线,单位:dagpm;黑色矢量箭头为风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;红色短实线为槽线;
黄色线所示区域为干区;红色双实线为切变线;红色箭头为低空急流;蓝色线所示区域为湿区)

Fig. 1 Weather analysis charts for (a, b, c) 500 hPa and (d, e, f) 700 hPa on

(a, d) 12 March 2018, (b, e) 17 April 2018, (c, f) 11 June 2019

(red line: contour line, unit: dagpm; black vector arrow: wind vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; solid red line: trough line;
yellow area: dry area; double red solid line: shear line; red arrow: low-level jet; blue area: wet area)

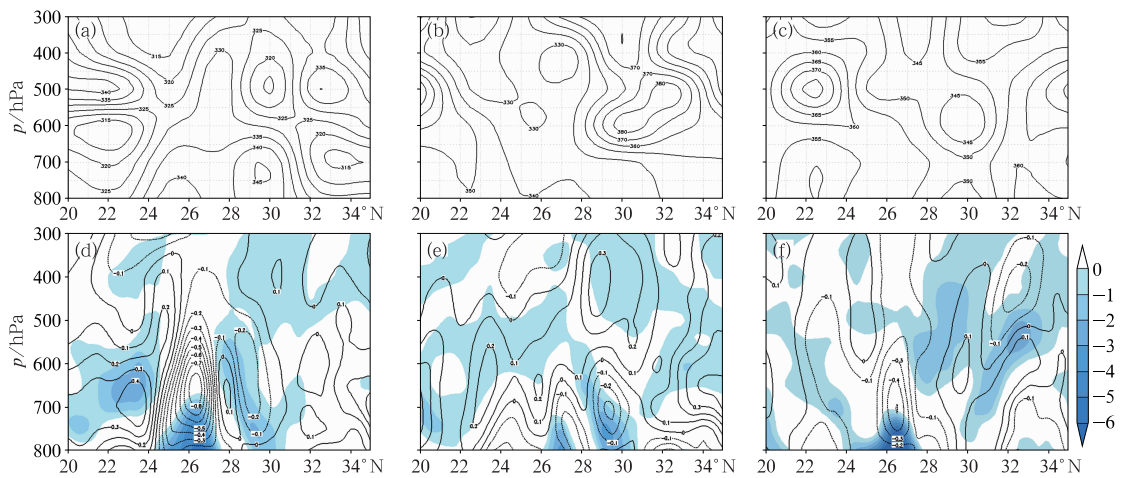


图 2 (a,d)2018 年 3 月 12 日、(b,e)2018 年 4 月 17 日、(c,f)2019 年 6 月 11 日

(a,b,c) θ_{se} (单位:K)和(d,e,f)垂直速度(黑线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

和水汽通量散度(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)沿 104°E 剖面

Fig. 2 Profile of (a, b, c) θ_{se} (unit: K), (d, e, f) vertical velocity (black line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

and water vapor flux divergence (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

along 104°E on (a, d) 12 March 2018, (b, e) 17 April 2018, (c, f) 11 June 2019

上空存在 θ_{se} 随高度快速递减的气层,存在对流不稳定形势。3 月 12 日由于高低空急流的耦合为对流

提供了良好的动力背景,促进中低层具有更强的垂直运动,辐合上升运动达到 500 hPa(图 2a)。4 月

17 日与 6 月 11 日在小槽、切变线共同作用下,垂直运动主要在中低层发展(图 2b,2c)。其热力、动力条件特征与其他强对流运动在强度、发展区域等方面存在一定差异,因此可针对其发展特性选取相关物理量的合适阈值用于识别雹暴过程。

3.2 湿热力垂直螺旋度

从小槽触发下热力、动力条件着手,可利用湿热力垂直螺旋度作为雹暴潜势判定指标。螺旋度与垂直运动有关,当螺旋度与广义位温相结合时,利用湿热力垂直螺旋度($H_{\theta_{se}}$)可分析不稳定条件、辐合抬升条件、水汽垂直分布情况,也可间接体现不稳定能量的积累等(张培昌等,2001;Witt et al,1998)。湿热力垂直螺旋度($H_{\theta_{se}}$)表达式经化简为:

$$H_{\theta_{se}} = \frac{w}{\rho} \left[\frac{\partial(v\theta^*)}{\partial x} - \frac{\partial(u\theta^*)}{\partial y} \right]$$

表 2 湿热力垂直螺旋度分布特征(单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
Table 2 Vertical helicity of humid heat force distribution characteristics
(unit: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

个例	2018 年 3 月 12 日	2018 年 4 月 17 日	2019 年 6 月 11 日	判定指标
降雹地上空大值中心	10	5	0.8	0.8

3.3 水汽垂直螺旋度

由于湿热力垂直螺旋度中含有的水汽因子对温度的修正量级小,对水汽条件的灵敏度较低,需要结合水汽垂直螺旋度(H_q)等对水汽分布更为灵敏的物理量进行诊断(杨帅等,2013)。小槽触发的雹暴过程,水汽多积聚在低层,中低层水汽垂直螺旋度负值异常值显著,16 个个例中水汽垂直螺旋度中心值多达到 $0.8 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。3 月 12 日过程在高低空急流耦合等影响下,水汽垂直输送加强,水汽垂直螺旋度中心值达到 $3.5 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot$

式中: w,u,v 分别为等压坐标系中的速度分量, ρ 为密度, θ^* 为广义位温。通过统计分析可知小槽触发雹暴过程中湿热力垂直螺旋度大值中心与降雹地存在良好对应关系,16 个小槽触发降雹过程中有 81.25% 的过程在降雹前 6 h 内,湿热力垂直螺旋度大值中心都大于 $0.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,因此可将此阈值范围作为降雹潜势判定指标之一。3 个个例中,3 月 12 日、4 月 17 日过程分别是在冷平流、高空急流的影响下,对流运动主要在中高层发展,湿热力垂直螺旋度中心都大于 $0.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ (表 2,图 3);6 月 11 日过程是在低层热低压影响下,对流运动维持机制主要促进低层垂直上升运动发展,湿热力垂直螺旋度中心为 $0.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

$\text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$,水汽垂直螺旋度负值区域与水汽通量散度负值区域的重合,促进中低层水汽辐合上升运动和湿度大值区的形成(图 4a)。6 月 11 日过程受低层热低压影响暖湿空气在低层积聚、向上输送,水汽的垂直输送中心位于 700 hPa 附近,达到 $3 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ (图 4b)。4 月 17 日过程没有低空急流带来水汽及促进上升运动,水汽输送主要以水平输送为主(图 4c)。将 2 个物理量结合诊断的方法能高效灵敏地诊断出 3 个个例皆存在降雹潜势。

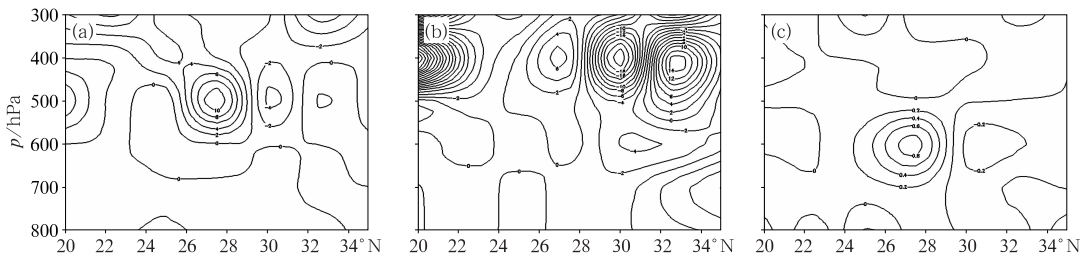


图 3 (a)2018 年 3 月 12 日、(b)2018 年 4 月 17 日、(c)2019 年 6 月 11 日 14 时湿热力垂直螺旋度沿 104°E 剖面(单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 3 Vertical cross-section of wet heat vertical helicity along 104°E at 14:00 BT on (a) 12 March 2018, (b) 17 April 2018, (c) 11 June 2019 (unit: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

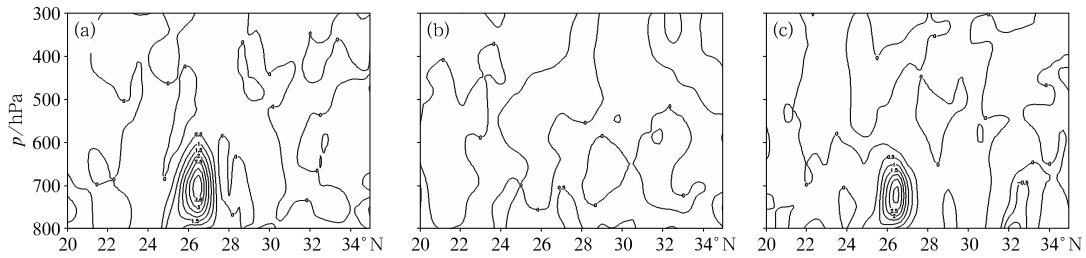


图 4 同图 3, 但为水汽垂直螺旋度(单位: $10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the vertical helicity of water vapor (unit: $10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)

4 强雹暴的维持发展与诊断

4.1 强垂直风切变对雹暴的维持作用

在小槽触发的强雹暴过程中, 强风切变在对流发展过程中明显增强, 有利于水平涡度转为垂直涡度, 增强风暴内旋转性, 促进对流组织化发展, 使强对流结构更紧密, 进一步促进雹暴发展成强雹暴过程(吴海英等, 2017)。根据强雹暴过程的发展特征选取相应物理量参数和回波阈值, 可诊断具有降雹潜势的个例发展成强雹暴的过程。热力切变平流参数(J)综合表征雹暴过程风场垂直切变所带来的具体影响及与低层辐合、高层辐散的流动力学结构特征(齐彦斌等, 2010), 其可用于强雹暴过程诊断, 表达式为:

$$J = \left[- \left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \right) \right] + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta^*}{\partial p} \right]$$

式中: u, v 分别为等压坐标系中 X 方向、 Y 方向的速度分量, θ^* 为广义位温, J_1, J_2 为 J 的分量:

$$J_1 = - \left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \right)$$

$$J_2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta^*}{\partial p}$$

雹暴发展过程中 J_1, J_2 垂直梯度增大, 热力切变平流参数大值中心有所增大时, 说明在垂直风切变作用下对流不断发展。由 16 个雹暴个例统计发现强风切变影响下的强雹暴过程, 对流层中低层 500 hPa 以下 J 的绝对值为 $3 \times 10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2018 年 3 月 12 日达到阈值具有强雹暴潜势(图 5g), 联系径向速度图发现雹暴发展初期垂直方向入流与出流共存, 垂直风切变在对流层中低层对

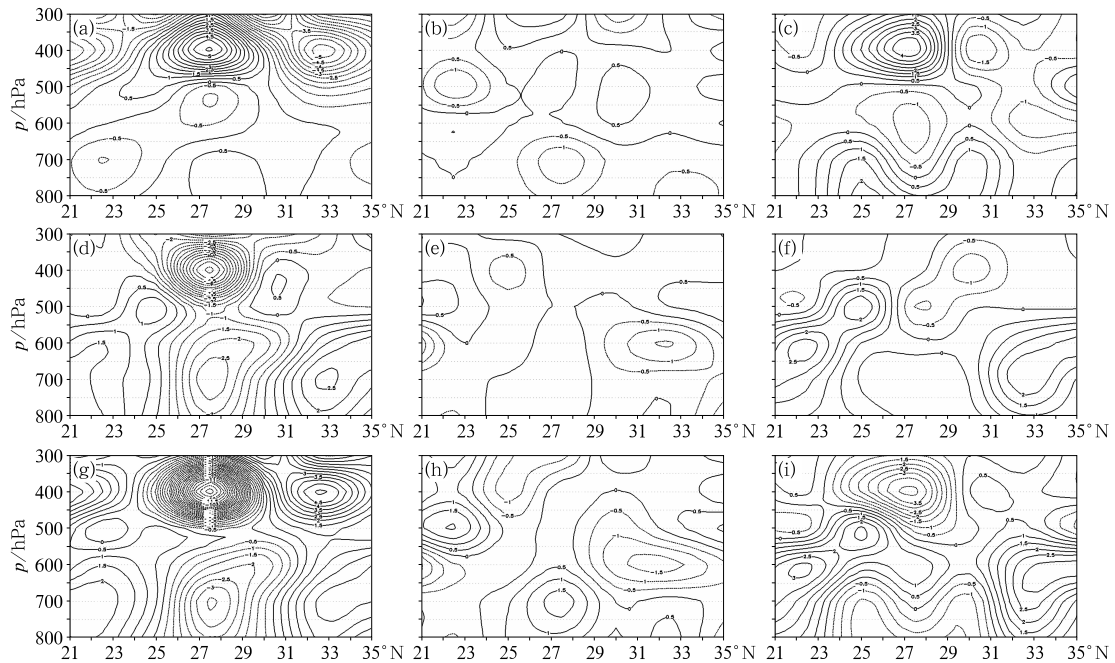


图 5 (a, d, g) 2018 年 3 月 12 日、(b, e, h) 2018 年 4 月 17 日、(c, f, i) 2019 年 6 月 11 日的 (g, h, i) 热力切变平流参数 J 及其分量 (a, b, c) J_1 、(d, e, f) J_2 沿 104°E 剖面(单位: $10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Thermal shear advection parameters (g, h, i) J and their components (a, b, c) J_1 , (d, e, f) J_2 along 104°E on (a, d, g) 12 March 2018, (b, e, h) 17 April 2018 and (c, f, i) 11 June 2019 (unit: $10^{-8} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

流分布不均的情况下增强了中层的辐合强度和旋转 特征促使雹暴单体强烈发展(图6d,6j)。4月17日、

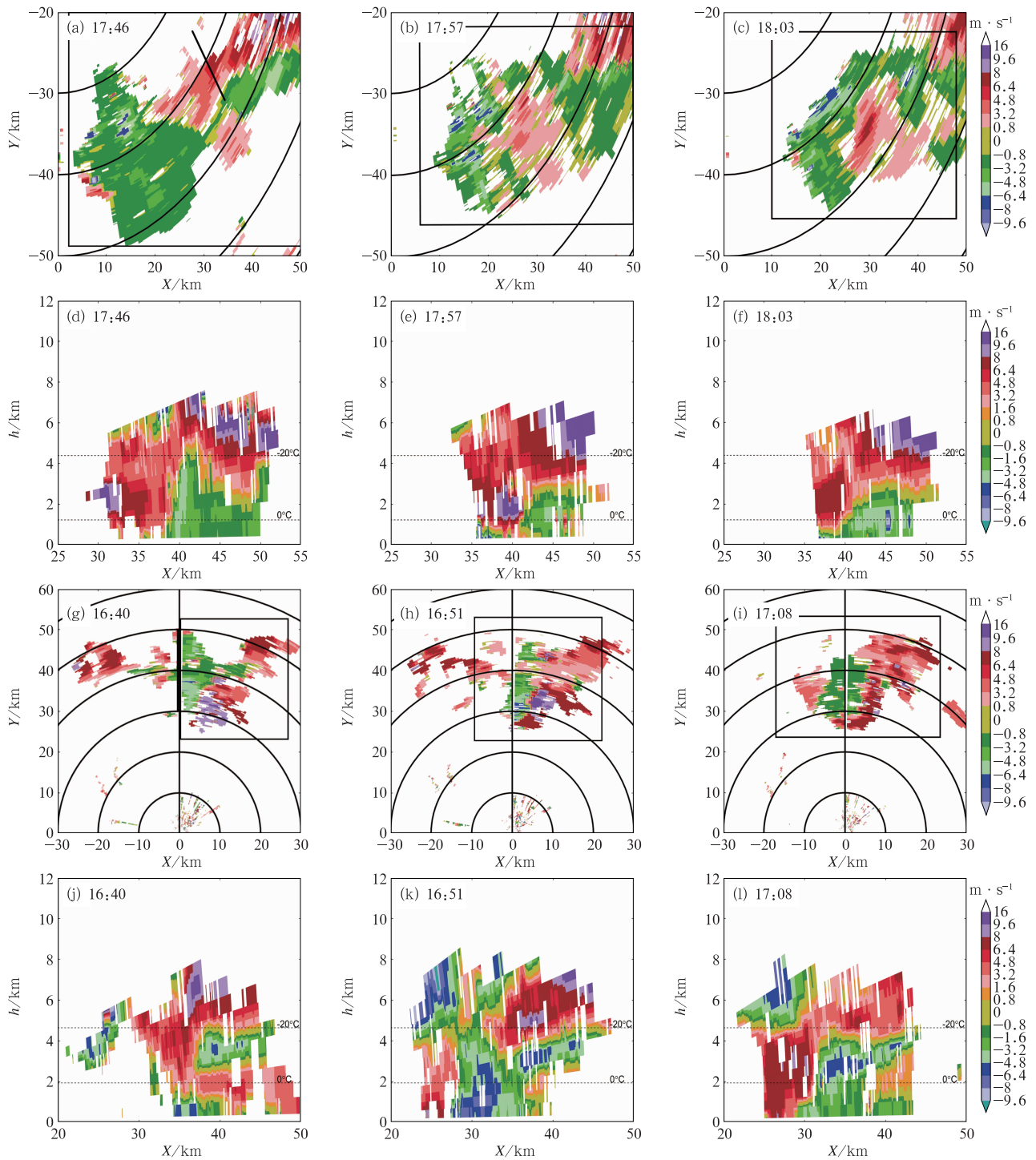


图6 2018年(a~f)3月12日、(g~l)4月17日(a~c,g~i)0.5°仰角径向速度及(d~f,j~l)各单体中心沿径向剖面(图6a和6g中的黑色直线为剖面)

(a,d)17:46,(b,e)17:57,(c,f)18:03;(g,j)16:40,(h,k)16:51,(i,l)17:08

Fig.6 (a~c, g~i) Radial velocity diagram at 0.5° elevation on (a~f) 12 March, (g~l) 17 April 2018 and (d~f, j~l) the radial cross-sections of the center of each cell

(black line in Figs. 6a, 6g: profile)

(a, d) 17:46 BT, (b, e) 17:57 BT, (c, f) 18:03 BT; (g, j) 16:40 BT, (h, k) 16:51 BT, (i, l) 17:08 BT

6 月 11 日个例 J 的绝对值未达到阈值(图 5h,5i)。根据热力切变平流参数分布特征判定只有 3 月 12 日个例具有强降雹潜势。

4.2 单体合并过程的促进作用

4.2.1 单体合并过程

除了强风切变影响,小槽触发的雹暴过程中单体合并过程是雹暴发展成强雹暴过程的重要因素。单体合并过程的上游回波为下游回波的发展提供了丰富的水汽、下沉出流等,促进下游回波发展(侯淑梅等,2018b)。在强风切变区域的单体合并有利于中低层对流运动的加强与向上发展(徐燕等,2018)。如图 7 可知,整体的合并过程主要在合并前中期阶段促进降雹单体强回波中心向上发展,进一步发展成为强雹暴过程。3 月 12 日、4 月 17 日个例具有单体合并现象。3 月 12 日 17:46 合并中期,单体 A、B、C 外围 30 dBz 回波已合并(图 8g),整体以飑线形势发展增强后,单体 B、C 在强风切变区域的合并促进着中低层对流运动发展,促使降雹单体 C 回波中心范围增大、强度增强到 55 dBz。4 月 17 日是多个单体合并成强单体降雹的过程。16:51 合并中期,强回波中心迅速发展,高度达到 4 km(图 9e),其余回波的下沉出流在主体回波后部形成入流,不同气流的结合促进主体对流的发展。17:08 合并后期,降雹单体强回波中心可达到 55 dBz(图 9h)。

4.2.2 单体合并过程雹暴回波特征

通过回波分析发现单体合并的影响主要体现在发展中期促进雹暴进一步发展阶段,使得最终雹暴强度不同(表 3)。利用较为稳定发展的中后期雹暴回波特征提取的诊断指标更具有代表性与适用性。3 月 12 日发展中期,中高层辐散的抽吸作用加强上升气流,17:34 雹云向上伸展至-20℃以上,水成物粒子在-20℃~0℃高度左右不断增长,高空回波增强(图 8d,图 9d)。0.5°仰角上粒子识别图中已观察到低层存在霰粒子生成发展(图 10d)。成熟阶段,合并过程为多单体的发展提供了能量,回波存在弱回波区等冰雹天气发生的典型特征。粒子识别图中也可看到雹云中有冰雹粒子的存在(图 10g)。4 月 17 日 16:51 发展中期,3 个块状回波合并成具有多个中心的单体继续发展。气旋式环流的形成促进着强对流运动加强,粒子识别图中低层有雨和霰粒子的生成,有利于冰雹粒子的生成发展,在 0℃以上强回波中心范围迅速扩张(图 8e,图 9e,图 10e)。6 月 11 日 15:01 的发展中期,回波中心范围、强度增强至 55 dBz,在中低层小槽、切变、热低压共同影响下低层对流强烈发展,垂直方向上回波中心从低层向上发展(图 8f,8i;图 9f,9i)。由于 0℃层高度较高,只有少量冰相粒子输送至 0℃以上发展生成冰雹粒子。粒子识别图中低层大部分为雨,少量冰晶(图 10f)。如 3 个个例所示 0℃以上的强回波特征

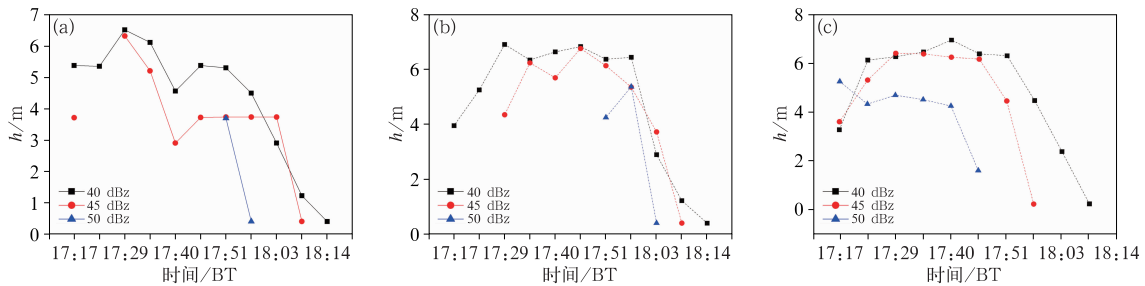


图 7 2018 年 3 月 12 日单体(a)A、(b)B、(c)C 的 40、45、50 dBz 回波顶高随时间变化
Fig.7 Variations of the 40, 45, 50 dBz echo top heights of the individual (a) A, (b) B, (c) C with time on March 12 2018

表 3 雹暴过程反射率因子特征

Table 3 Characteristics of reflectivity factors during hailstorm

雹暴过程	初始回波中心强度/ dBz,高度/km	发展初期/dBz	发展中期/dBz	成熟阶段/dBz	降雹后/dBz	强冰雹特征
2018 年 3 月 12 日	40,4	50	60	60	45	弱回波区
2018 年 4 月 17 日	45,6	50	55	55	40	中气旋
2019 年 6 月 11 日	40,3	50	55	55	45	弱回波区

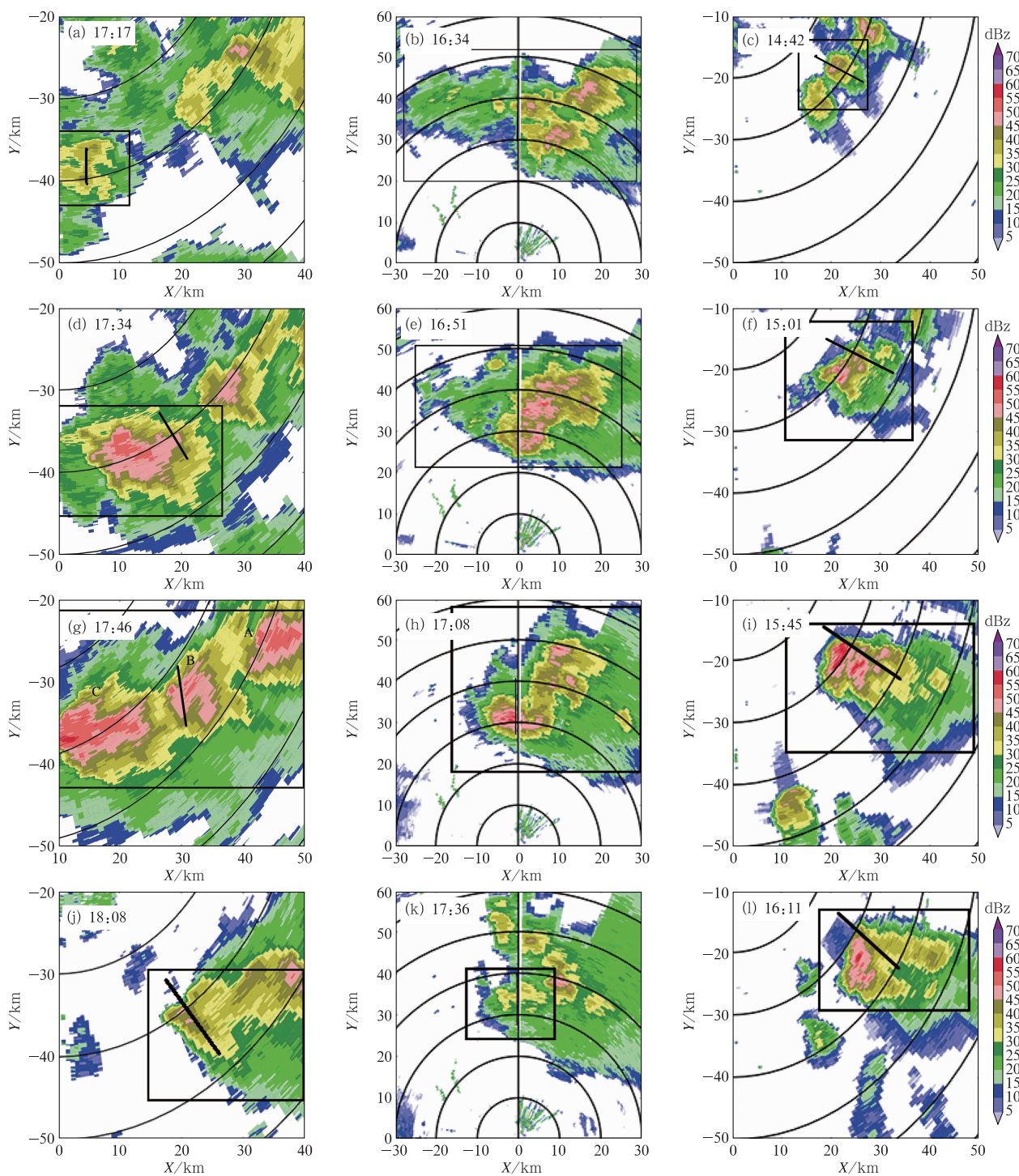


图 8 (a,d,g,j)2018 年 3 月 12 日、(b,e,h,k)2018 年 4 月 17 日和(c,f,i,l)2019 年 6 月 11 日各阶段组合反射率
Fig. 8 Composite reflectivity graphs on (a, d, g, j) 12 March 2018,
(b, e, h, k) 17 April 2018 and (c, f, i, l) 11 June 2019

与强降雹过程密切相关,可利用强回波中心与 0°C 层的关系诊断强雹暴个例。

4.2.3 回波顶高与特殊层之间的特征

0°C 层高度以上的强回波现象体现了上升气流

的强度,诊断强雹暴潜势时考虑 0°C 高度与强回波的关系可有利于强雹暴的识别。这样即使对流在发展后期强烈发展成强雹暴过程也能被准确识别,并且不局限于单体合并促进的强雹暴过程。当根据贵

州实际情况具体分析 0°C 层高度与强回波顶高的关系时,发现 0°C 层高度具有一定的季节变化。统计分析发现强回波顶高度随着 0°C 层高度变化时,在 0°C 高度位于 2500 m 时有明显分段情况。利用小槽触发的雹暴过程发展中后期强回波顶高(45~55 dBz)与

0°C 层高度相关性的分析得出 45 dBz 回波顶高度与 0°C 层高度显著相关性更高,达到 53.5%。因此在考虑强回波顶高度与 0°C 层高度关系时以 0°C 层高度是否超过 2500 m 为界,45 dBz 回波顶高度与 0°C 层高度关系得出相关诊断方法(表4)。当 $H_0 \leq 2500$ m

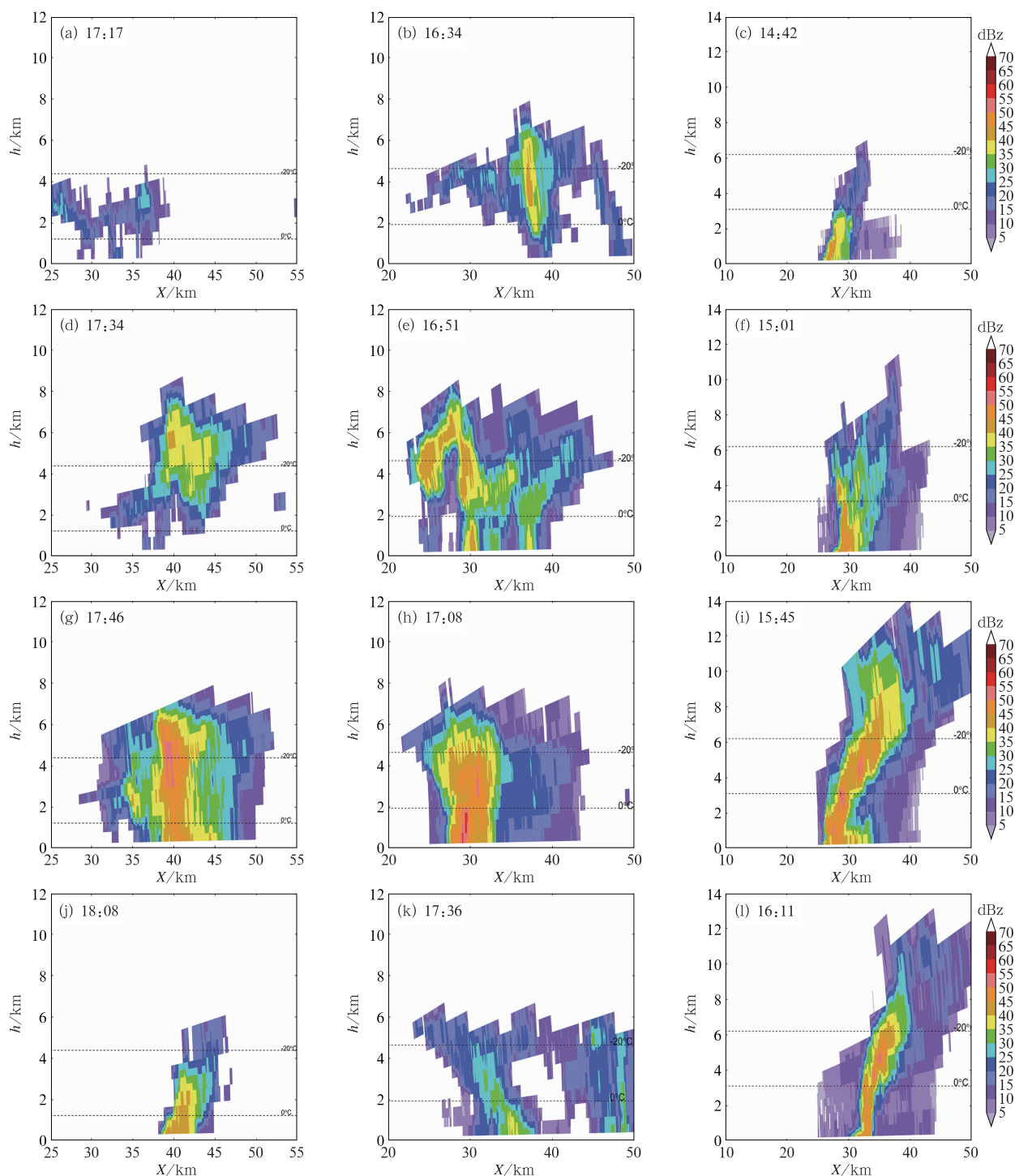


图 9 同图 8, 但为各阶段反射率因子剖面(沿图 8 中黑色直线)

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for reflectivity factor profiles (black lines in Fig. 8) at various stages

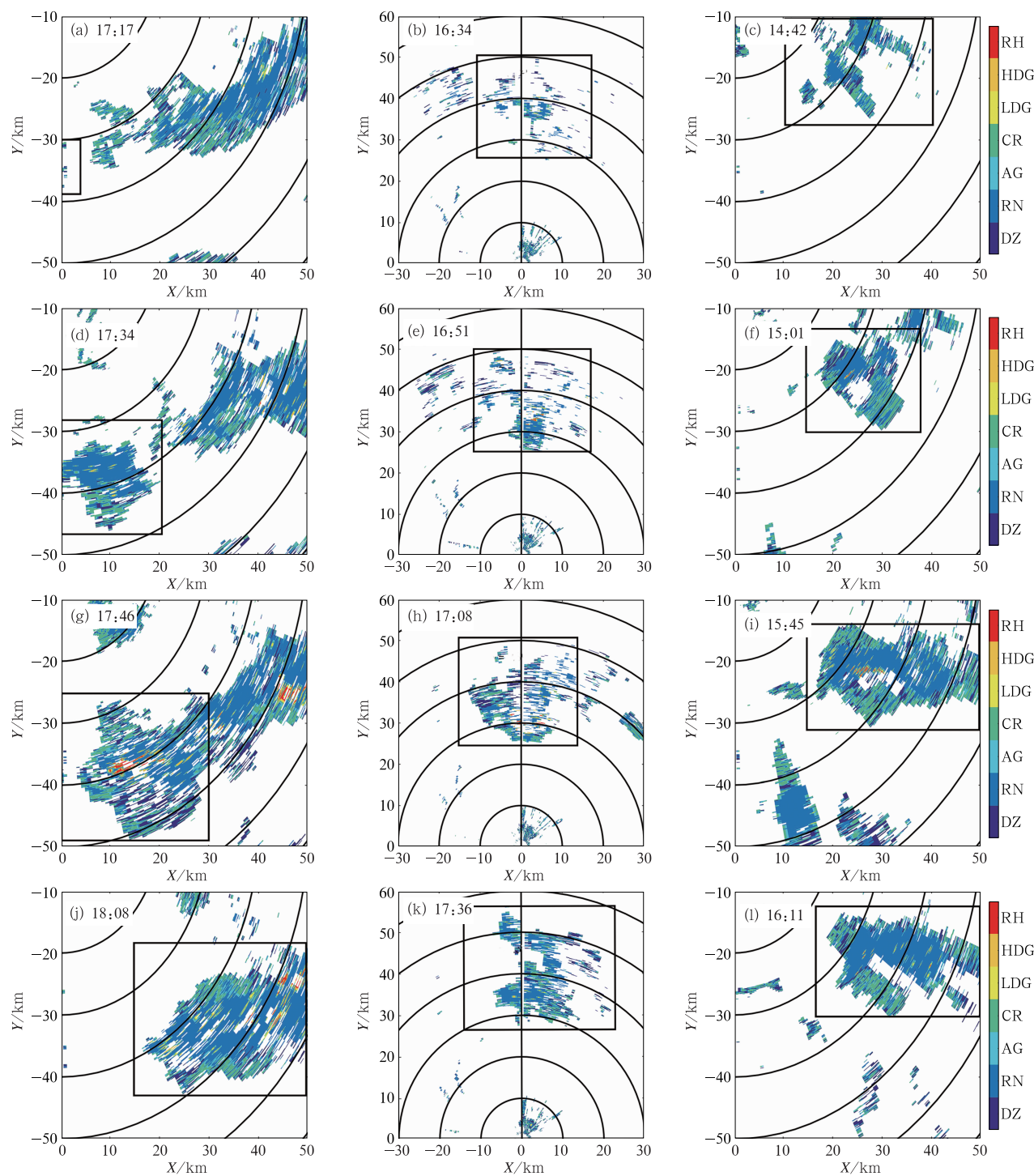


图 10 同图 8, 但为 0.5° 仰角粒子识别

(RH:雨夹雹, HDG:高密度雹, LDG:低密度雹, CR:冰晶, AG:冰晶混合物, RN:雨, DZ:毛毛雨)

Fig. 10 Same as Fig. 8, but for particle identification diagram of 0.5° elevation

(RH:rain and hail, HDG:high-density hail, LDG:low-density hail, CR:ice crystal, AG:ice crystal mixture, RN:rain, DZ:drizzle)

时,根据 45 dBz 回波顶高度与 0℃层高度线性关系计算得出的线性方程,作为小槽触发强雹暴过程的判据准确性更高。当 $H_0 > 2500$ m 时,回归方程判断强雹暴的正确率较低,此时可运用统计分析得出

的 0℃层高度与 45 dBz 回波顶高度的差值来判别强雹暴过程。3 个个例在通过上文中降雹潜势判定后,利用表 4 中方法诊断只有 3 月 12 日个例满足 $H_{45\text{ dBz}} > Y$,可判定其为强雹暴过程,诊断结果与实

表 4 45 dBz 回波顶高度与 0℃ 层高度预警方法

Table 4 Early warning methods of 45 dBz echo top height and 0℃ layer height	
高度	诊断方法
$H_0 \leq 2500 \text{ m}$	$H_{45 \text{ dBz}} > 3304.25 + 0.932H_0$
$H_0 > 2500 \text{ m}$	$H_{45 \text{ dBz}} > 2602.146 + H_0$

况一致。

5 结论与讨论

针对黔西山区小槽触发的雹暴过程构建了具有针对性的雹暴诊断方法,利用此方法对 3 个雹暴个例进行分析,主要得出如下结论:

(1)确定个例为小槽触发背景后,利用湿热力垂直螺旋度大于 $0.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 的大值中心和水汽垂直螺旋度大于 $0.8 \times 10^{-5} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$ 的大值中心与降雹地的对应关系可初步确定强对流运动的降雹潜势。在判定具有降雹潜势后,利用热力切变平流参数、45 dBz 回波顶高度与 0℃ 高度层关系阈值,可识别出强雹暴过程。

(2)从雹暴热力、动力条件着手识别,可避免将其他强对流过程看作是雹暴过程。对下午、晚上的雹暴过程在发展初期就可利用大尺度环流形势特征和相关物理量阈值识别出具有降雹潜势的个例。根据单体合并影响下的强雹暴过程回波特征,所选取回波指标阈值对其他小槽触发强雹暴过程同样适用。

(3)此种诊断方法适用于贵州地区小槽触发的雹暴过程,能准确诊断出 3 个个例的降雹潜势,并且识别出 3 月 12 日为强雹暴过程。对于诊断我国西南地区小槽触发的雹暴过程也具有一定借鉴意义。

(4)本文主要针对小槽触发雹暴进行诊断分析,后续还将针对更多的雹暴类型对诊断方法进行进一步的改进补充,以对不同雹暴过程更全面地诊断分析。文中在判别是否为小槽触发雹暴过程时以主观判别为主,今后将进一步开展利用雹暴概念模型自动判别雹暴环境条件特征的研究。

参考文献

- 曹艳察,田付友,郑永光,等,2018. 中国两级阶梯地势区域冰雹天气的环境物理量统计特征[J]. 高原气象,37(1):185-196. Cao Y C, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2018. Statistical characteristics of environmental parameters for hail over the two-step terrains of China[J]. Plateau Meteor, 37(1):185-196(in Chinese).

- 陈关清,杨群,李伟栋,等,2016. 贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J]. 干旱气象,34(1):163-172. Chen G Q, Yang Q, Li W D, et al, 2016. Contrast analysis on two continuous hail weather processes triggered by cold air in Tongren of Guizhou Province[J]. J Arid Meteor, 34(1):163-172(in Chinese).
- 樊鹏,1994. 用风暴剖面 45 dBz 高度选择防雹作业时机[J]. 山西气象, (4):29-31. Fan P, 1994. Selection of hail suppression operation time with 45 dBz height of storm profile[J]. Shanxi Meteor Quart, (4):29-31(in Chinese).
- 方翀,王西贵,盛杰,等,2017. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象,36(5):1368-1385. Fang C, Wang X G, Sheng J, et al, 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteor, 36(5):1368-1385 (in Chinese).
- 冯晋勤,俞小鼎,蔡菁,等,2017. 福建春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置及环境条件分析[J]. 气象,43(11):1354-1363. Feng J Q, Yu X D, Cai J, et al, 2017. Flow pattern and ambient condition analysis of spring southwest low-level jet warm sector severe convection in Fujian[J]. Meteor Mon, 43(11):1354-1363(in Chinese).
- 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等,2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象,44(12):1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12):1565-1574(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):500-510(in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019. 冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J]. 气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4):483-495(in Chinese).
- 侯淑梅,闵锦忠,刁秀广,等,2018a. 飑线发展过程中回波合并的特征分析[J]. 大气科学学报,41(3):367-376. Hou S M, Min J Z, Diao X G, et al, 2018a. Analysis of echoes merging characteristics during squall line development process[J]. Trans Atmos Sci, 41(3):367-376(in Chinese).
- 侯淑梅,王秀明,尉英华,等,2018b. 山东省初秋一次大范围强对流过程落区和抬升触发机制分析[J]. 气象,44(1):80-92. Hou S M, Wang X M, Wei Y H, et al, 2018b. Analysis of an extensive severe convection falling area and lifting trigger mechanism in early autumn at Shandong Province[J]. Meteor Mon, 44(1):80-92(in Chinese).
- 刘小艳,索勇,王瑾,2017. 基于 CPAS 系统的贵州安顺市冰雹云识别指标研究[J]. 干旱气象,35(4):688-693. Liu X Y, Suo Y, Wang J, 2017. Study on identification index of hail cloud based on

- CPAS system in Anshun of Guizhou[J]. *J. Arid Meteor.* 35(4): 688-693(in Chinese).
- 罗辉, 苟阿宁, 康岚, 等, 2020. 四川盆地一次中反气旋超级单体的雷达回波特征研究[J]. *气象*, 46(10): 1362-1374. Luo H, Gou A N, Kang L, et al, 2020. Radar echo characteristics of anmeso-anticyclonic supercell of Sichuan in August 2016[J]. *Meteor Mon.* 46(10): 1362-1374(in Chinese).
- 齐彦斌, 冉令坤, 洪延超, 2010. 强降水过程中热力切变平流参数的诊断分析[J]. *大气科学*, 34(6): 1201-1213. Qi Y B, Ran L K, Hong Y C, 2010. Diagnosis of thermodynamic shear advection parameter in heavy rainfall events[J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(6): 1201-1213(in Chinese).
- 苏永玲, 马秀梅, 马元仓, 等, 2018. 高空冷涡和副高背景下青海冰雹特征对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 12(4): 22-29. Su Y L, Ma X M, Ma Y C, et al, 2018. Comparative analysis on hail characteristics under cold vortex and subtropical high background in Qinghai[J]. *Desert Oasis Meteor.* 12(4): 22-29(in Chinese).
- 王迪, 牛淑贞, 曾明剑, 等, 2020. 河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J]. *气象*, 46(5): 618-628. Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. *Meteor Mon.* 46(5): 618-628(in Chinese).
- 吴海英, 陈海山, 刘梅, 等, 2017. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. *气象*, 43(2): 141-150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al, 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. *Meteor Mon.* 43(2): 141-150(in Chinese).
- 徐燕, 孙竹玲, 周筠珩, 等, 2018. 一次具有对流合并现象的强飑线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系[J]. *大气科学*, 42(6): 1393-1406. Xu Y, Sun Z L, Zhou Y J, et al, 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(6): 1393-1406(in Chinese).
- 杨帅, 陈斌, 高守亭, 2013. 水汽螺旋度和热力螺旋度在华北强“桑拿天”过程中的分析及应用[J]. *地球物理学报*, 56(7): 2185-2194. Yang S, Chen B, Gao S T, 2013. Diagnostic analyses and applications of the moisture helicity and the thermal helicity for two strong “Sauna” weather processes in northern China[J]. *Chin J Geophys*, 56(7): 2185-2194(in Chinese).
- 易笑园, 孙晓磊, 张义军, 等, 2017. 雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析[J]. *气象学报*, 75(6): 981-995. Yi X Y, Sun X L, Zhang Y J, et al, 2017. Evolution of radar parameters and lightning activity during thunderstorm cells merging[J]. *Acta Meteor Sin.* 75(6): 981-995(in Chinese).
- 张桂莲, 常欣, 黄晓璐, 等, 2018. 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*, 37(5): 1364-1374. Zhang G L, Chang X, Huang X L, et al, 2018. The environmental conditions and radar echo characteristics of the super cell storm under the background of the northeast cold vortex[J]. *Plateau Meteor.* 37(5): 1364-1374(in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等, 2001. 雷达气象学: 第2版[M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, et al, 2001. *Radar Meteorology*[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 张小娟, 陶玥, 刘国强, 等, 2019. 一次冰雹天气过程的云系发展演变及云物理特征研究[J]. *气象*, 45(3): 415-425. Zhang X J, Tao Y, Liu G Q, et al, 2019. Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics[J]. *Meteor Mon.* 45(3): 415-425(in Chinese).
- 赵赵云, 傅朝, 刘新伟, 等, 2017. 西北东部暖区大暴雨中尺度系统演变特征[J]. *高原气象*, 36(3): 697-704. Zhao Q Y, Fu Z, Liu X W, et al, 2017. Characteristics of mesoscale system evolution of torrential rain in warm sector over Northwest China[J]. *Plateau Meteor.* 36(3): 697-704(in Chinese).
- 周永水, 原野, 牟克林, 等, 2013. 基于对流参数的贵州春季冰雹潜势预报[J]. *热带地理*, 33(1): 9-12. Zhou Y S, Yuan Y, Mou K L, et al, 2013. Hail potential trend forecast based on convection parameters in Guizhou[J]. *Trop Geogra.* 33(1): 9-12(in Chinese).
- Brandes E A, Zhang G F, Vivekanandan J, 2003. An evaluation of a drop distribution-based polarimetric radar rainfall estimator[J]. *J Appl Meteor.* 42(5): 652-660.
- Donavon R A, Jungbluth K A, 2007. Evaluation of a technique for radar identification of large hail across the upper midwest and central plains of the United States[J]. *Wea Forecasting*, 22(2): 244-254.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. *Wea Forecasting*, 11(4): 560-581.
- Kumjian M R, Mishra S, Giangrande S E, et al, 2016. Polarimetric radar and aircraft observations of saggy bright bands during MC3E[J]. *J Geophys Res Atmos*, 121(7): 3584-3607.
- Snyder J C, Ryzhkov A V, Kumjian M R, et al, 2015. A ZDR column detection algorithm to examine convective storm updrafts[J]. *Wea Forecasting*, 30(6): 1819-1844.
- Weisman M L, Rotunno R, 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics[J]. *J Atmos Sci*, 57(9): 1452-1472.
- Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al, 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. *Wea Forecasting*, 13(2): 286-303.

(本文责编:俞卫平)