

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

摘要: 利用探空资料、美国国家环境预报中心(NCEP) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 逐6小时再分析资料、X波段双偏振雷达观测资料对频发的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, 小槽触发下三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 $0.8 \times 10^{-1} \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 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45dBz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; 利用以上方法诊断三例降雹过程时, 检验了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: P48

Diagnostic Method Analysis of Hailstorm Triggered by Low Trough in Western

Guizhou Mountain Area

XIANG Shujun^{1,2}ZHOU Yunjun^{1,3}ZOU Shuping⁴YANG Zhe⁴ZENG Yong⁴

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

2 Guizhou Climate Center, Guiyang 550002

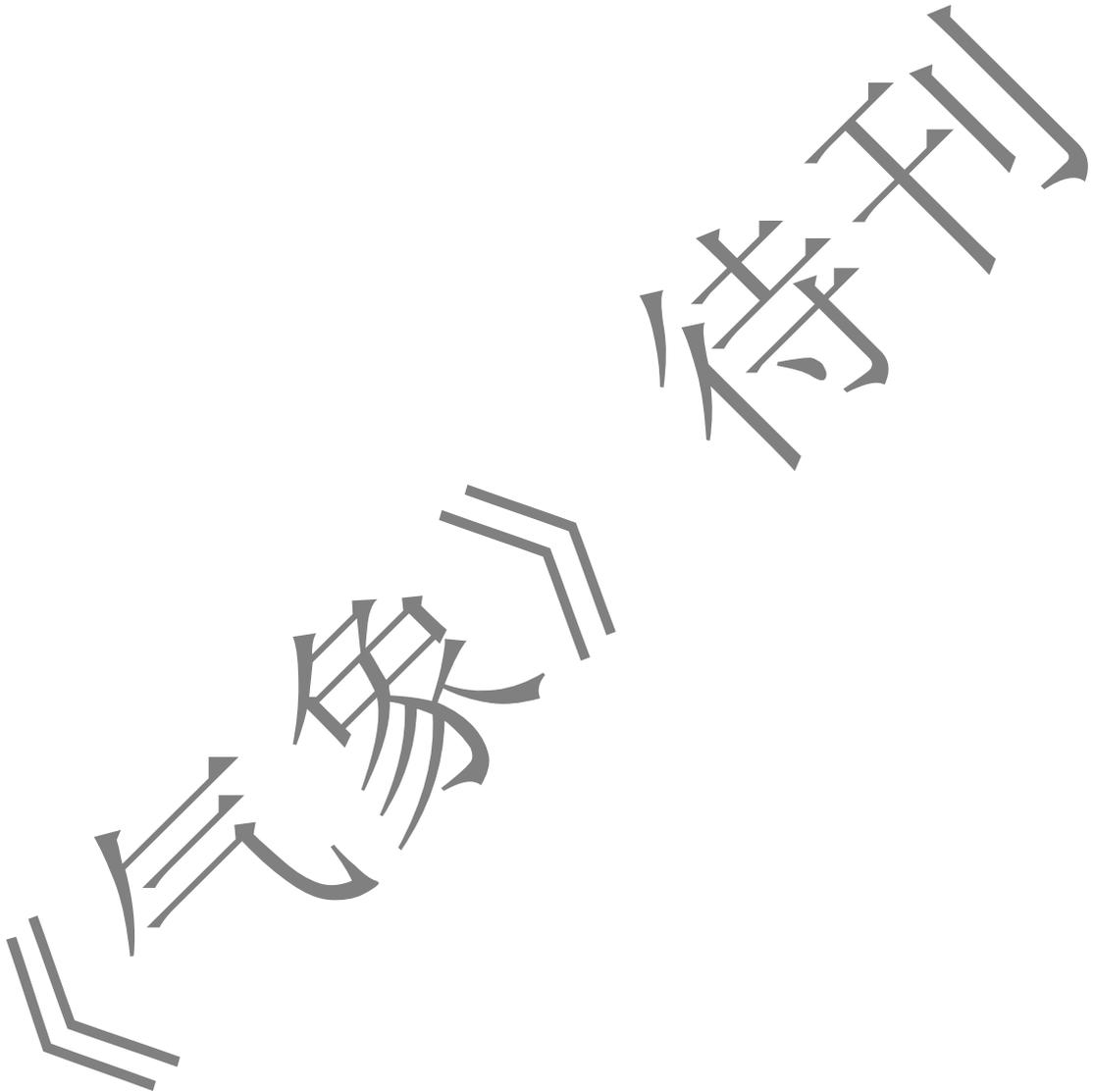
3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081

Abstract: This paper used controlling data, National Centers for Environmental Prediction($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) reanalysis data by 6 hours and X-band dual-polarization radar observing data to diagnose and analyze the hailstorm triggered by small trough. According to the features of occurrence and development and these predictive indexes with good indicative significance to the hailstorm triggered by small trough, a diagnosis method was constructed. By the method, three hailstorms with different intensity triggered by small trough were diagnosed and analyzed, and the prediction effects were verified. The results indicate that: The hailstone potential of individual cases can be diagnosed effectively by the corresponding relationship between the central region with a large value of the vertical helicity of humid heat force greater than $0.8 \times 10^{-1} \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ and the center region with a large value of the vertical helicity of water vapor greater than $0.8 \times 10^{-5} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and the hailstone land. During strong wind shear and monomer amalgamation promote its occurrence and development. In view of this feature, the probability of hailstorm monomer developing into strong hailstorm can be diagnosed by using the correspondence between the center region of large value 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 45dBz echo top height and 0°C height. The

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
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: zhouyj@cuit.edu.cn

38 difference in squall line strong hailstorm and hailstorm were diagnosed by using the dignosis of hailstorm triggered
39 by small trough formed by the above prediction indexes combined with echo features.
40 **Key words:**hailstorm; convection parameter; radar echo; diagnostic method; vertical helicity of humid heat force



41 引言

42 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;
43 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
44 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
45 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
46 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、
47 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
48 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
49 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新旧单体迭代,也是促
50 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
51 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对强对流天气进行潜
52 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
53 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
54 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
55 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
56 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)
57 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
58 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
59 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雹工作的
60 识别指标。除此之外,国外学者 Donavon and Jungbluth (2007) 使用 50dBz 回波高度和 MLT 作为美国强雹暴
61 的预警指标之一。樊鹏(1994)等利用 45dBz 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。
62 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
63 数用于雹暴预报预警。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
64 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
65 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
66 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
67 暴的短期预报提供一定参考。

68 1 资料与方法

69 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
70 宁站的常规观测资料、探空资料、NECP(0.5°×0.5°)逐 6h 再分析资料,根据模糊逻辑算法、自适应衰减
71 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。
72 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
73 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。

74 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
75 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
76 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。并以 3 个示例检测诊
77 断方法的实用性。

78 2 雹暴天气概况

79 2.1 雹暴日概况

80 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
81 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

82 方为青藏高原。威宁处于特殊地形地势下，平均海拔达到 2200m。其具体经纬度为 103° 36' ~104° 45' E，
 83 26° 30' ~27° 25' N。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
 84 景条件，这些小槽多位于云贵川等地区。

85 本文利用表 1 中 19 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
 86 日三次雹暴过程作为示例，展示以其余 16 个雹暴过程特征总结的小槽触发雹暴诊断方法。2018 年 3 月 12
 87 日为一次飚线过程，17:45-17:55 威宁县幺站镇发生短时强降雨雹，降雹密度为 700~1000 粒 m⁻²，冰雹平均
 88 直径达到 10 mm。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 300~500
 89 粒 m⁻²，冰雹平均直径达到 10mm。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
 90 小为 20 粒 m⁻²左右，冰雹平均直径达到 10mm。

91
92

表 1 雹暴个例基本情况表

Table.1 Basic situation table of hailstorm cases

降雹时间	降雹地点	密度/(粒·m ⁻¹)
2018 年 3 月 12 日	幺站镇	700~1000
2018 年 3 月 13 日	金钟镇、龙场镇	100~200, 300~1000
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

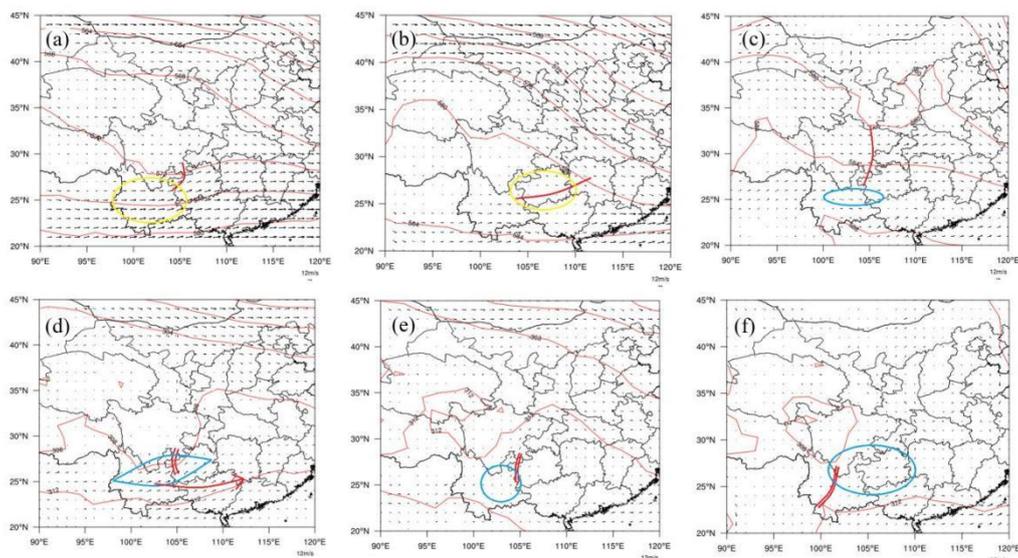
93 3 雹暴的触发及相关物理量参数

94 小槽触发的雹暴过程都具有相似的环境场特征，通过触发雹暴过程的环境场特征提取与中尺度触发维
 95 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。从小槽触发下热动力条件显著着手，选取能
 96 体现热动力、水汽特征的相关物理量诊断个例降雹潜势。

97 3.1 触发雹暴的环境条件特征

98 小槽触发的雹暴过程中环流形势多具有相似的特征，高空冷涡和高脊等大尺度系统的稳定存在使得不
 99 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
 100 发降雹过程（图 1a~1c）。槽后冷空气出流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

101 变线与地面干线、辐合线触发低层对流，加强对流运动垂直发展（图 1d~1f）。天气尺度小槽既要依赖于大
 102 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
 103 响下，发现其雹暴过程都具有中低层热力条件显著的特征，并且水汽、抬升条件也是主要在中低层发展。
 104 如图 2 所示降雹地上空存在 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
 105 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)。
 106 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)。其热力条件特
 107 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，可针对其发展特性选取相关物理量的及合适
 108 阈值用于识别雹暴过程。

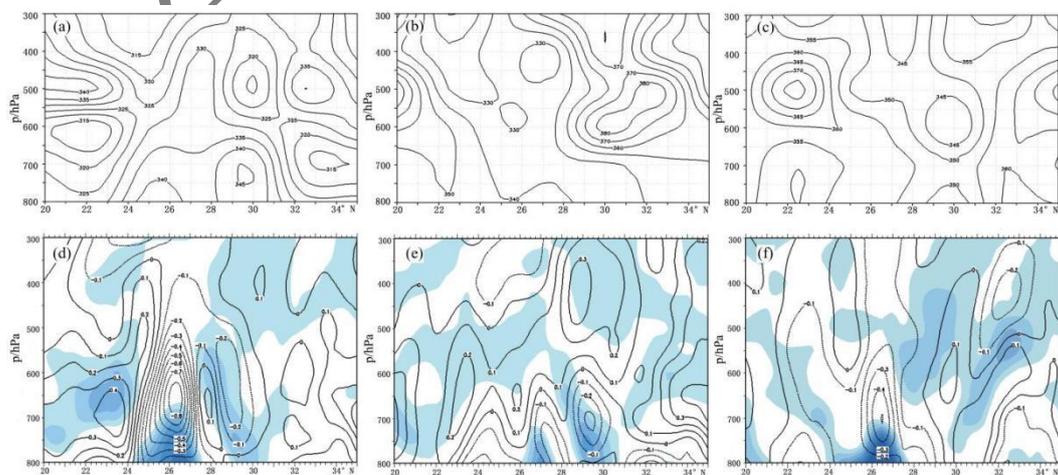


109
 110 图 1 (a, d) 2018 年 3 月 12 日、(b, e) 2018 年 4 月 17 日、(c, f) 2019 年 6 月 11 日 (a, b, c) 500 hPa 和 (d, e, f) 700 hPa
 111 天气分析图

112 (红色线为等高线, 单位: dagpm, 黑色矢量箭头为风矢量, 单位: $m s^{-1}$, 红色短实线为槽线, 黄色区域为干区, 双实线为切变线, 红色箭头为低空急
 113 流, 蓝色区域为湿区)

114 Fig.1 Weather analysis charts for (a, b, c) 500 hPa and (d, e, f) 700 hPa on (a, d) March 12 2018, (b, e) April 17 2018, (c, f) June 11
 115 2019

116 (The red line is the contour line, unit: dagpm, the black vector arrow is the wind vector, unit: $m s^{-1}$, The solid red line is the groove line, the yellow area is the dry
 117 area, the double solid line is the shear line, the red arrow is the low-level jet, and the blue area is the wet area)



118

119 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)、(d, e, f)
 120 垂直速度 (曲线, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和水汽通量散度 (填图, 单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$) 沿 104°E 剖面图

121 Fig.2 profile of (a, b, c) θ_{se} (unit: K)、(d, e, f) vertical velocity (curve, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (drawing,
 122 unit: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$) along 104°E on (a, d) March 12 2018, (b, e) April 17 2018, (c,f)June 11 2019

123 3.2 湿热力垂直螺旋度

124 从小槽触发下热动力条件显著着手, 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
 125 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
 126 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

127 直螺旋度 ($H_{\theta_{se}}$) 表达式经化简为: $H_{\theta_{se}} = \frac{w}{\rho} \left[\frac{\partial(v\theta^*)}{\partial x} - \frac{\partial(u\theta^*)}{\partial y} \right]$, 其中 w 、 u 、 v 分别为等压坐标系中的速度分量,

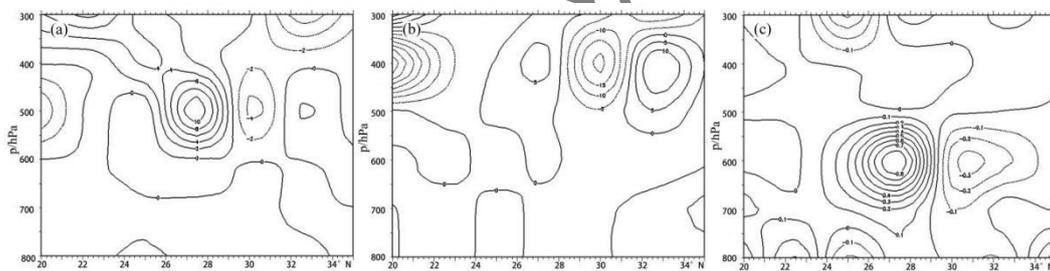
128 ρ 为密度, θ^* 为广义位温。通过统计分析可知小槽触发雹暴过程中湿热力垂直螺旋度大值中心与降雹地有

129 良好对应关系, 16 个小槽触发降雹过程中达到 81.25% 的小槽触发雹暴过程在降雹前 6h 内, 湿热力垂直螺
 130 旋度大值中心都不小于 $0.8 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$, 因此可将此阈值范围作为降雹潜势判定指标之一。三个示
 131 例中, 3月12日、4月17日分别在冷平流、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
 132 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日在低层热低压影响下对流运动维持机制主要
 133 促进低层垂直上升运动发展, 湿热力垂直螺旋度中心为 $0.8 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$

134 表 2 湿热力垂直螺旋度分布特征表 (单位: $10^{-3}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

135 Table.2 Vertical helicity of humid heat force distribution characteristics table (unit: $10^{-3}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

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



136 图 3 (a) 2018年3月12日、(b) 2018年4月17日、(c) 2019年6月11日 14:00 湿热力垂直螺旋度沿 104°E 剖面图 (单
 137 位: $10^{-3}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)
 138

139 Fig.3 Vertical cross-section of wet heat vertical helicity along 104°E at 14:00 on (a)March 12 2018, (b)April 17 2018, (c)June 11
 140 2019(unit: $10^{-3}\cdot\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

141 3.3 水汽垂直螺旋度

142 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
 143 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
 144 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
 145 $0.8 \times 10^{-5} \text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}^{-2}$ 。3月12日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
 146 到 $3.5 \times 10^{-5} \text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}^{-2}$, 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
 147 上升运动和湿度大值区的形成 (图 4a)。6月11日受低层热低压影响暖湿空气在低层积聚、向上输送, 水汽
 148 的垂直输送中心位于 700hPa 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日没有低空急流带来水汽及促
 149 进上升运动, 水汽输送主要以水平输送为主 (图 4c)。两个物理量结合诊断的方法能高效灵敏的诊断出 3 个
 150 个个例皆存在降雹潜势。

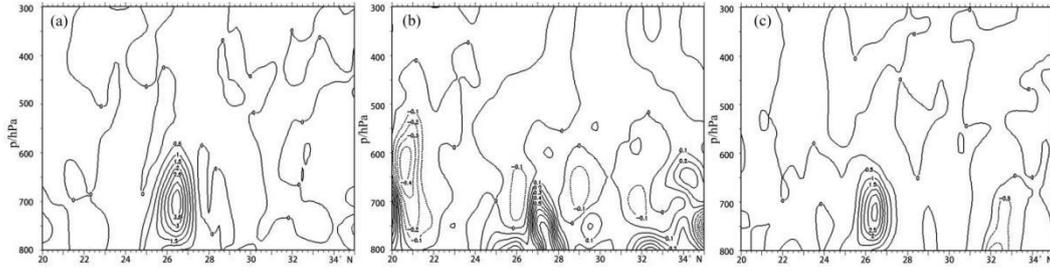


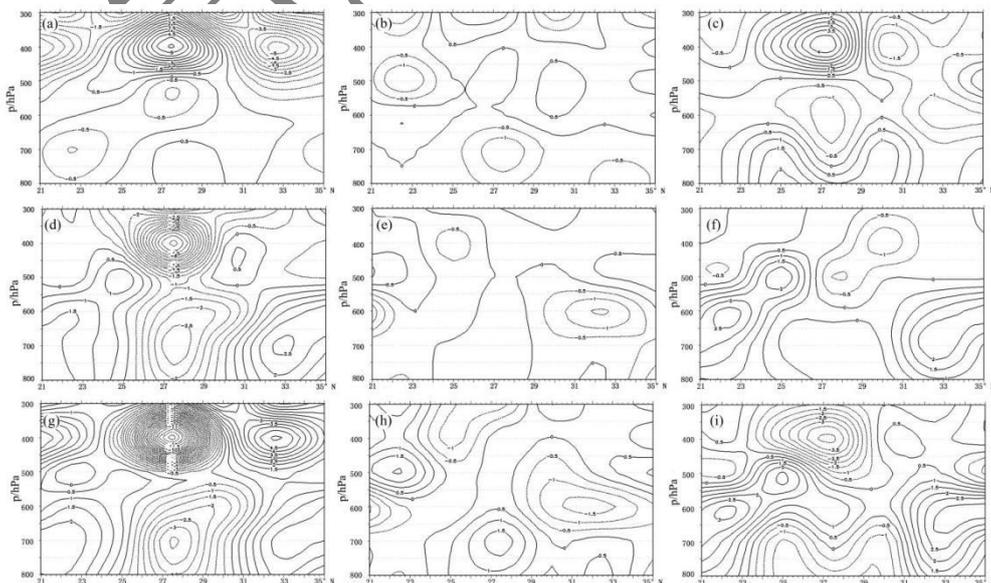
图 4 (a) 2018 年 3 月 12 日、(b) 2018 年 4 月 17 日、(c) 2019 年 6 月 11 日 14: 00 水汽垂直螺旋度沿 104° E 剖面图 (单位: $10^{-5} \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig.4 The vertical helicity of water vapor along 104° E at 14:00 on (a) March 12 2018, (b) April 17 2018, (c) June 11 2019 (unit: $10^{-5} \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-2}$)

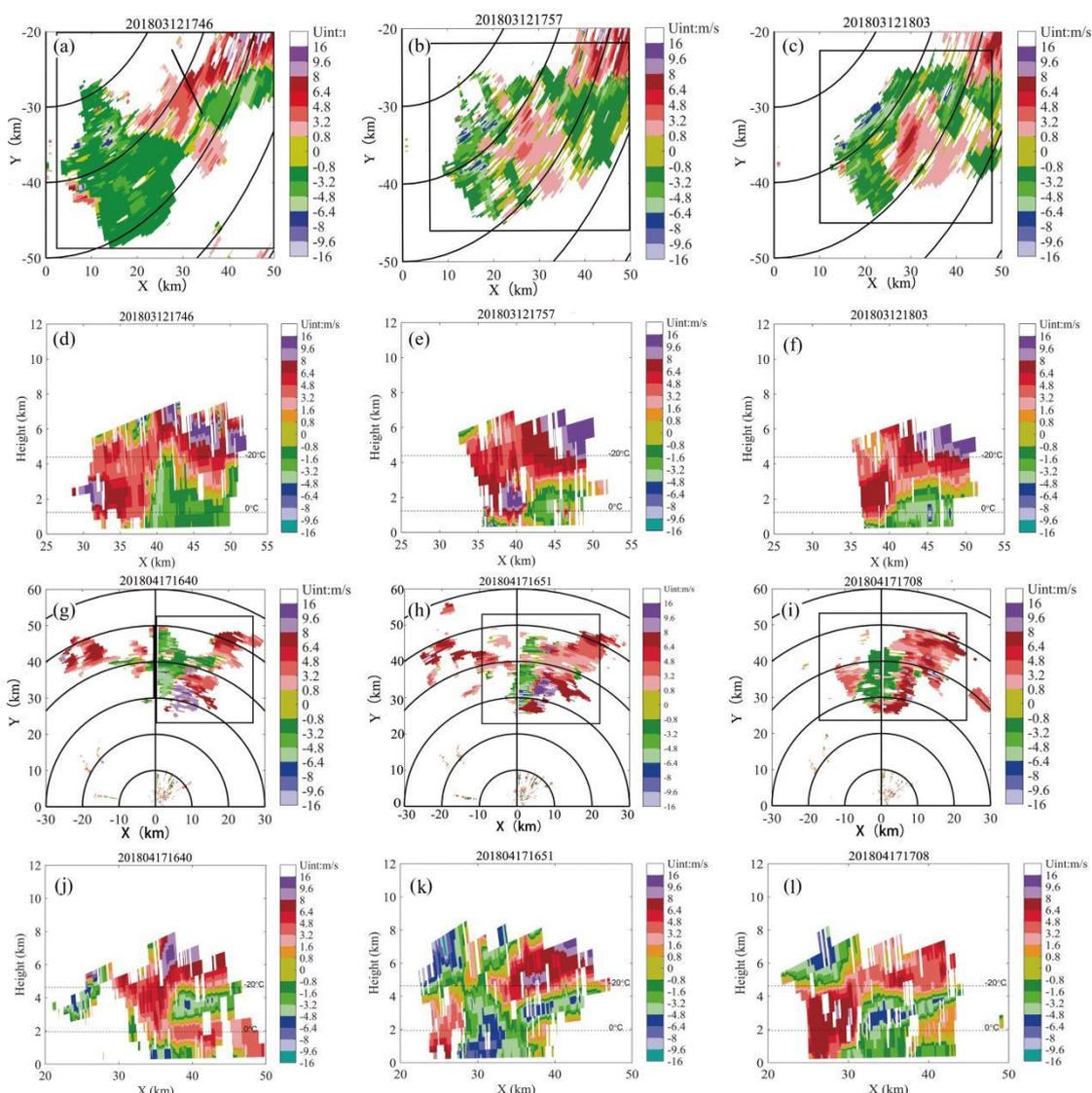
4 强雹暴的维持发展与诊断

4.1 强垂直风切变对雹暴的维持作用

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, 促进了对流组织化发展, 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), 可用于强雹暴过程诊断。其表达式为: $J = -\left(\frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta^*}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta^*}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \frac{\partial \theta^*}{\partial p}$, 其中 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, 说明垂直风切变作用下对流不断发展。由 16 例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 500hPa 以下 J 的绝对值达到 $3 \times 10^{-8} \text{K} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。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、6 月 11 日 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 日具有强降雹潜势。



172 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日热力切变平流参数 (g, h, i) J
 173 及其分量 (a, b, c) J_1 、(d, e, f) J_2 沿 104° E剖面图 (单位: $10^{-8}KPa^{-1}s^{-1}$)
 174 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,
 175 g)March 12 2018, (b, e, h)April 17 2018and (c, f, i)June 11 2019(unit: $10^{-8}KPa^{-1}s^{-1}$)



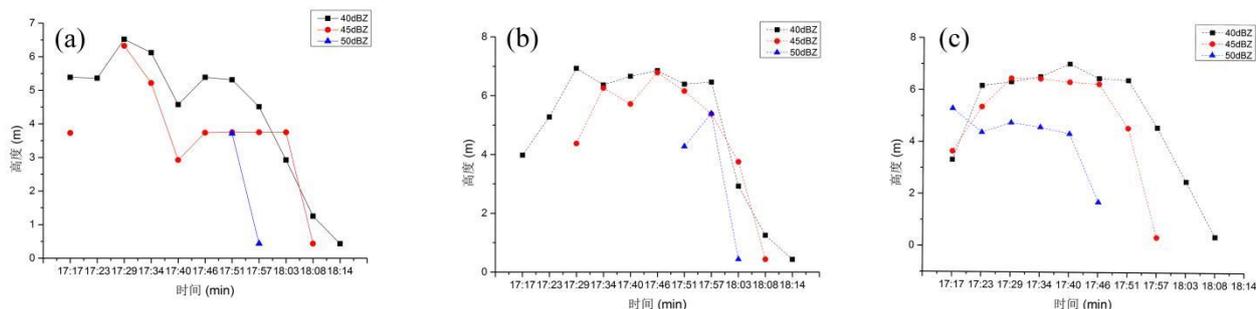
176 图6 (a~f) 2018年3月12日、(g~l) 2018年4月17日 (a~c, g~i) 0.5° 仰角径向速度图及 (d~f, j~k) 各单体中心沿径
 177 向剖面 (黑色直线为剖面, 单位: $m s^{-1}$)
 178 Fig.6 (a~c, g~i) Radial velocity diagram at 0.5° elevation angle on (a~f) March 12 2018, (g~l) April 17 2018 and (d~f,
 179 j~k) the radial cross-sections of the center of each cell(The black line is the section, unit: $m s^{-1}$)
 180

181 4.2 单体合并过程的促进作用

182 4.2.1 单体合并过程

183 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
 184 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,
 185 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
 186 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
 187 程。示例中 3 月 12 日、4 月 17 日具有单体合并现象, 3 月 12 日 17:46 合并中期, 单体 A、B、C 外围 30dBz
 188 回波已合并 (图 8g), 整体以爬线形势发展增强后, 单体 B、C 在强风切变区域的合并促进着中低层对流运

189 动发展，促使降雹单体 C 回波中心范围增大、强度增强到 55dBz。4 月 17 日是多个单体合并成强单体降雹
 190 的过程。16: 51 合并中期强回波中心迅速发展，高度达到 4km (8e)，其余回波的下沉出流在主体回波后部
 191 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 55dBz(9h)。



192
 193 图 7 2018 年 3 月 12 日单体 A (a)、B (b)、C (c) 的 40dBz、45dBz、50dBz 回波顶高随时间变化图(单位: km)
 194 Fig.7 The changes of the 40dBz,45dBz,50dBz echo top heights of the individual A(a),B(b),C(c) with time on March 12 2018(unit:km)

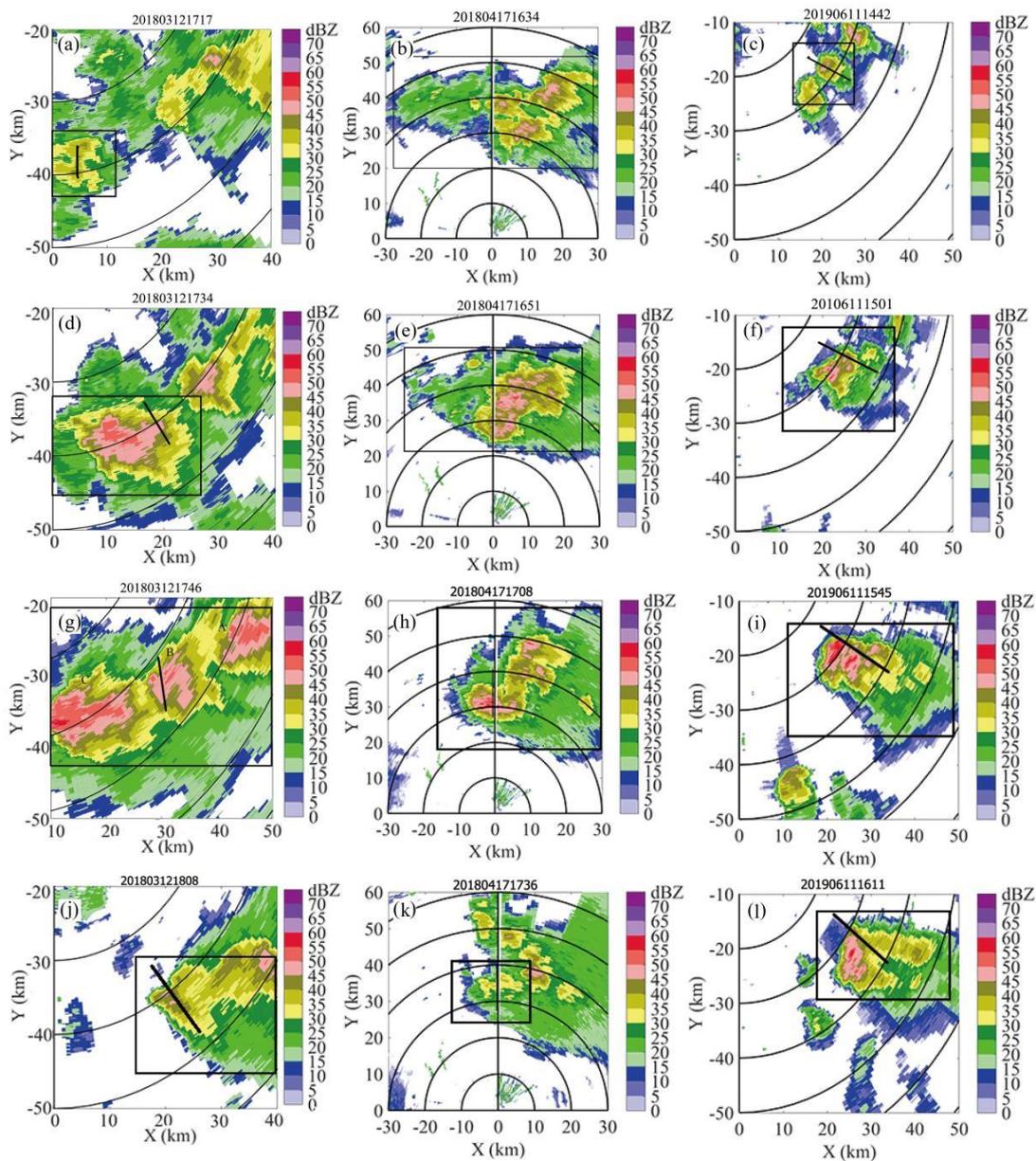
195 4.2.2 单体合并过程雹暴回波特征

196 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
 197 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
 198 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℃~
 199 0℃高度左右不断增长，高空回波增强（图 8d,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
 200 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
 201 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
 202 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
 203 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,9e,10e）。6
 204 月 11 日 15:01 发展中期，回波中心范围、强度增强至 55dBz，在中低层小槽、切变、热低压共同影响下低
 205 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,9f,9i）。由于 0℃层高度较高，只有少量冰
 206 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霰粒子，少量冰晶（图 10f）。如 3
 207 个示例所示 0℃以上的强回波特征与强降雹过程密切相关，可利用强回波中心与 0℃层的关系诊断强雹暴个
 208 例。

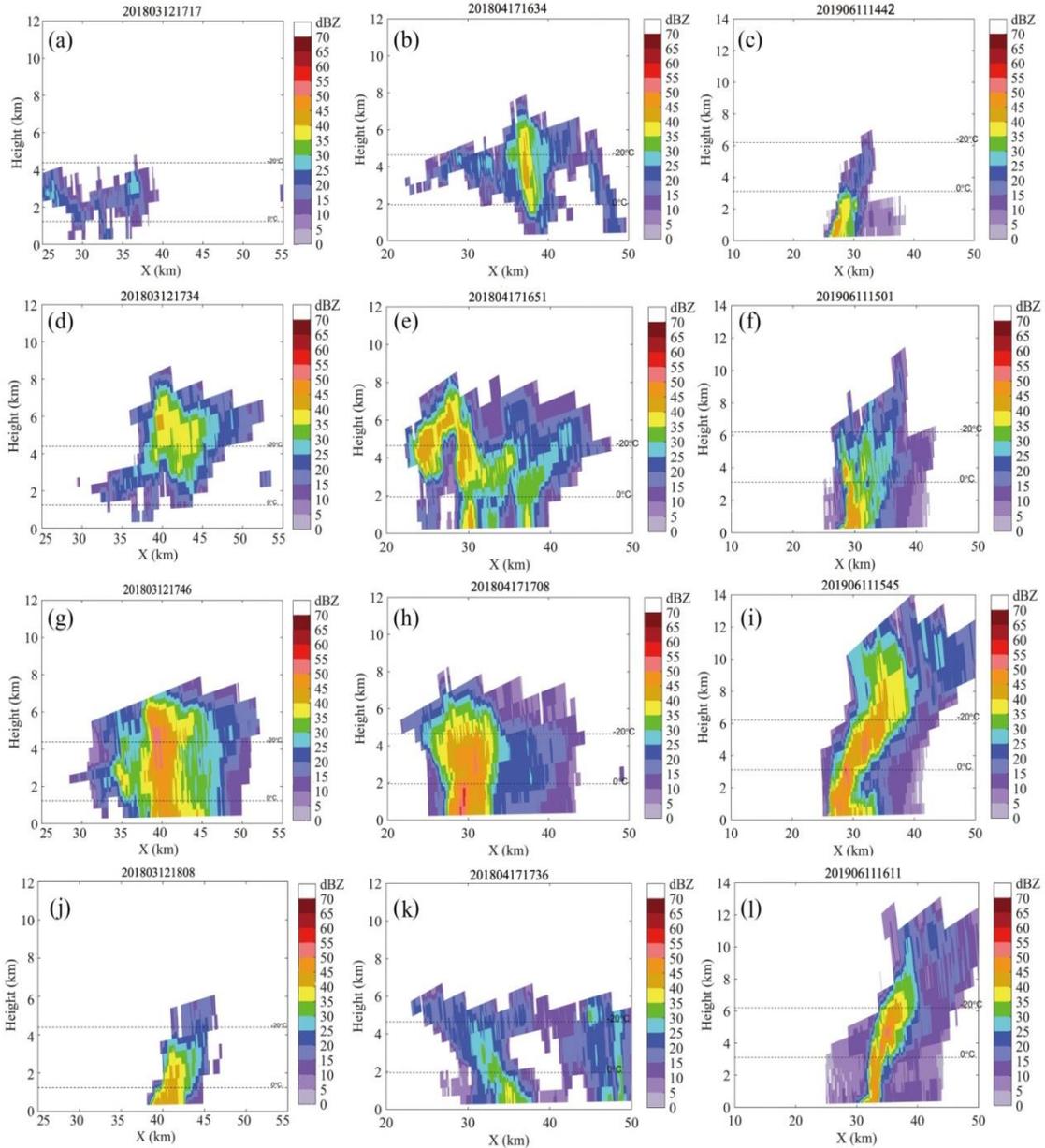
209 表 3 雹暴过程反射率因子特征

Table.3 Characteristics of reflectivity factors during hailstorm

时间	初始回波中心强度/dBz 及高度/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	45z, 6	50	55	55	40	中气旋
2019 年 6 月 11 日	40, 3	50	55	55	45	弱回波区



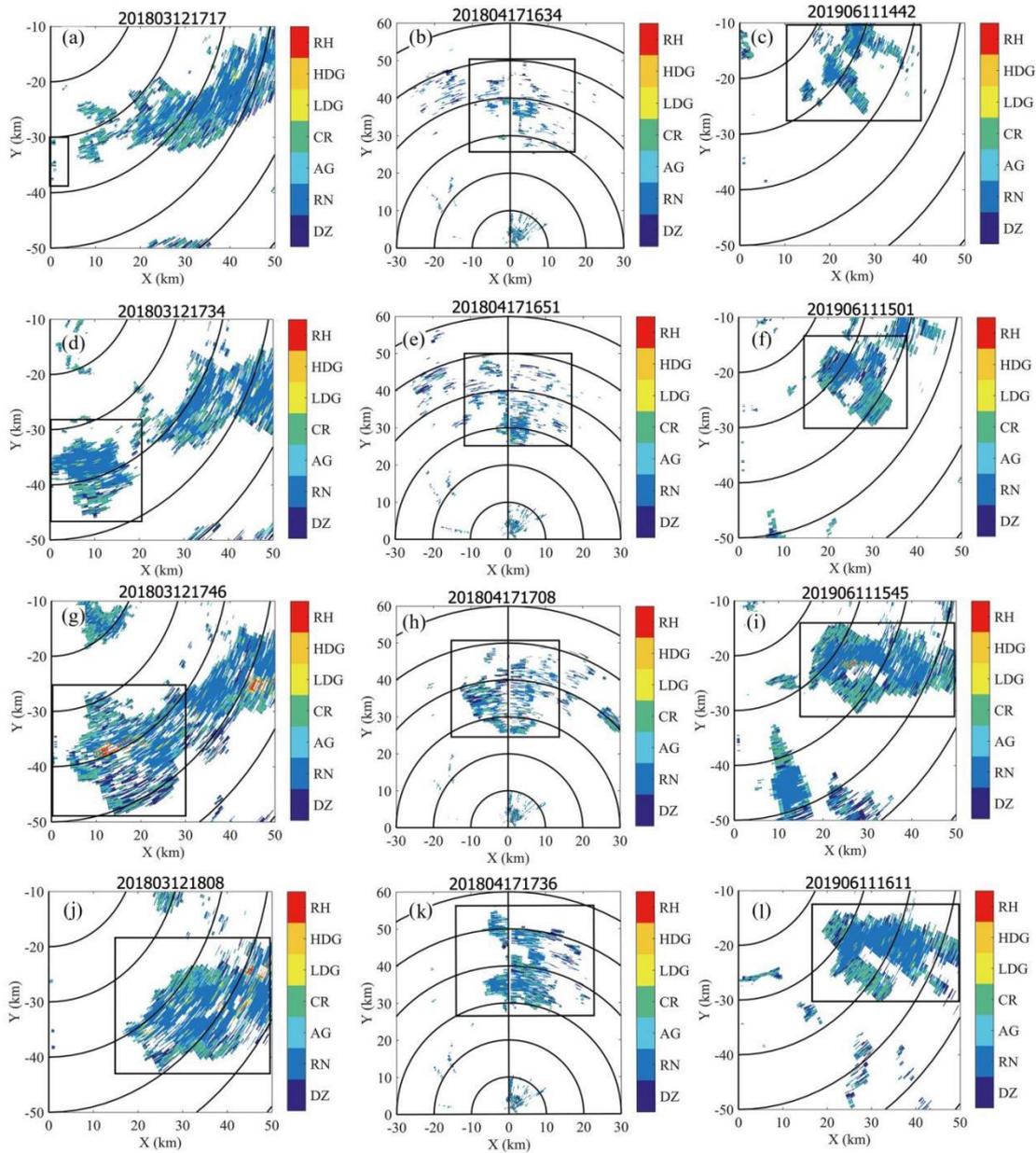
211
 212 图8 (a, d, g, j) 2018年3月12日、(b, e, h, k) 2018年4月17日、(c, f, i, l) 2019年6月11日各阶段组合反射率
 213 图(单位: dBz)
 214 Fig.8 Combined reflectance graphs on (a, d, g, j) March 12 2018, (b, e, h, k) April 17 2018, (c, f, i, l) June 11 2019(unit:
 215 dBz)



216

217 图9 (a, d, g, j) 2018年3月12日、(b, e, h, k) 2018年4月17日、(c, f, i, l) 2019年6月11日各阶段反射率因子
 218 剖面图 (图8中黑线为剖面, 单位: dBz)

219 Fig.9 Reflectance factor profiles at various stages on (a, d, g, j) March 12 2018, (b, e, h, k) April 17 2018 and (c, f, i,
 220 l) June 11 2019(The black line in Figure 8 is a section, unit: dBz)



221
 222 图 10 (a, d, g, j) 2018 年 3 月 12 日、(b, e, h, k) 2018 年 4 月 17 日、(c, f, i, l) 2019 年 6 月 11 日 0.5° 仰角粒子识
 223 别图
 224 Fig.10 Particle identification diagram of 0.5° elevation angle on (a, d, g, j) March 12 2018, (b, e, h, k) April 17 2018, (c,
 225 f, i, l) June 11 2019

226 **4.2.3 回波顶高与特殊层之间的特征**

227 0°C层高度以上的强回波现象体现了上升气流的强度，当诊断强雹暴潜势时考虑 0°C高度与强回波的关系
 228 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准确识别，并且不局限于
 229 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
 230 高度具有一定的季节变化。统计分析发现强回波顶高度在随着 0°C层高度变化时，在 0°C高度位于 2500m 时
 231 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 dBz~55 dBz）与 0°C层高度相关性
 232 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与 0°C层
 233 高度关系时以 0°C层高度是否超过 2500m 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
 234 4）。当 $H_0 < 2500\text{m}$ 时，根据 45dBz 回波顶高度与 0°C层高度线性关系计算得出的线性方程作为小槽触发强雹

235 暴过程的判据准确性更高。当 $H_0 > 2500\text{m}$ 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
236 的 0°C 层高度与 45dBz 回波顶高度的差值来判别强雹暴过程。3 个例在通过上文中降雹潜势判定后利用表 4
237 中方法诊断只有 3 月 12 日个例满足 $H_{45\text{dBz}} > Y$, 判定其为强雹暴过程, 诊断结果与实况一致。

238 表 4 45dBz 回波顶高度与 0°C 层高度预警方法

239 Table.4 Early warning methods of 45dBz echo top height and 0°C layer height

$H_0 < 2500\text{M}$	$H_{45\text{dBz}} > 3304.25 + 0.932H_0$
$H_0 > 2500\text{M}$	$H_{45\text{dBz}} > 2602.146 + H_0$

240 5 结论与讨论

241 本文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, 利用此方法对三例雹暴个
242 例进行分析, 主要得出如下结论:

243 (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 $0.8 \times 10^{-1} \text{m}^3 \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 的大值中心和水汽
244 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。
245 在判定具有降雹潜势后, 利用热力切变平流参数、45dBz 回波顶高与 0°C 高度层关系阈值, 可识别出强雹暴
246 过程。

247 (2) 从雹暴热动力条件显著着手识别, 可避免将其他强对流过程看做是雹暴过程。对下午、晚上的雹
248 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
249 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。

250 (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
251 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。

252 (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
253 的改进补充, 以达到对不同雹暴过程更全面的诊断分析。文中在判别是否为小槽触发雹暴过程时以主观判
254 别为主, 今后将进一步深入研究利用雹暴概念模型自动判别雹暴环境条件特征。

255 参考文献

- 256 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,
257 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).
- 258 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.
259 Contrast analysis on two continuous hail weather processes triggered by cold air in Tongren of Guizhou Province[J]. JArid Meteor, 34(1): 163-172 (in Chinese).
- 260 樊鹏, 1994. 用风暴剖面 45dBz 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 45dBz height
261 of storm profile[J]. Shanxi Meteor Quart., (4): 29-31 (in Chinese). (查阅所有网上资料, 未找到本条文献英文信息, 请联系作者确认)
- 262 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,
263 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteor, 36(5):
264 1368-1385 (in Chinese).
- 265 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,
266 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,
267 43(11): 1354-1363 (in Chinese).
- 268 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,
269 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12): 1565-1574 (in Chinese).
- 270 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
271 al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):
272 500-510 (in Chinese).
- 273 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
274 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).
- 275 侯淑梅, 王秀明, 尉英华, 等, 2018a. 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,

276 et al, 2018a. Analysis of an extensive severe convection falling area and lifting trigger mechanism in early autumn at Shandong Province[J]. Meteor Mon, 44(1):
277 80-92 (in Chinese).

278 侯淑梅, 闵锦忠, 刁秀广, 等, 2018b. 飚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, 2018b.
279 Analysis of echoes merging characteristics during squall line development process[J]. Trans Atmos Sci, 41(3): 367-376 (in Chinese).

280 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
281 identification index of hail cloud based on CPAS system in Anshun of Guizhou[J]. J Arid Meteor, 35(4): 688-693 (in Chinese).

282 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.
283 Radar Echo characteristics of an meso-anticyclonic supercell of Sichuan in August 2016[J]. Meteor Mon, 46(10): 1362-1374 (in Chinese).

284 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
285 of thermodynamic shear advection parameter in heavy rainfall events[J]. Chin J Atmos Sci, 34(6): 1201-1213 (in Chinese).

286 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,
287 2018. Comparative analysis on hail characteristics under cold vortex and subtropical high background in Qinghai[J]. Desert Oasis Meteor, 12(4): 22-29 (in
288 Chinese).

289 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
290 the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(5): 618-628 (in Chinese).

291 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.
292 Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. Meteor Mon, 43(2): 141-150 (in Chinese).

293 徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 等, 2018. 一次具有对流合并现象的强飚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
294 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):
295 1393-1406 (in Chinese).

296 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
297 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].
298 Chin J Geophys, 56(7): 2185-2194 (in Chinese).

299 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
300 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).

301 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
302 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
303 Meteor, 37(5): 1364-1374 (in Chinese).

304 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: 1-511. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, et al, 2001. Radar Meteorology[M]. 2nd
305 ed. Beijing: China Meteorological Press: 1-511 (in Chinese).

306 张小娟, 陶珣, 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.
307 Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics[J]. Meteor Mon, 45(3): 415-425 (in Chinese).

308 赵庆云, 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.
309 Characteristics of Mesoscale system evolution of torrential rain in warm sector over northwest China[J]. Plateau Meteor, 36(3): 697-704 (in Chinese).

310 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
311 trend forecast based on convection parameters in Guizhou[J]. Trop Geogra, 33(1): 9-12 (in Chinese).

312 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):
313 652-660.

314 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
315 States[J]. Wea Forecasting, 22(2): 244-254.

316 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.

317 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,
318 121(7): 3584-3607.

319 Snyder J C, Ryzhkov A V, Kumjian M R, et al, 2015. A Z_{DR} Column detection algorithm to examine convective storm updrafts[J]. Wea Forecasting, 30(6):

-
- 320 1819-1844.
- 321 Weisman M L, Rotunno R, 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics[J]. JAtmos Sci, 57(9): 1452-1472.
- 322 Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al, 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. WeaForecasting, 13(2): 286-303.
- 323
- 324

