

文章编号: 2096-1618(2025)01-0085-09

复杂地形区域一次雹暴过程的观测及模拟研究

任薪儒¹, 周筠珩^{1,2}, 罗喜平³, 曾勇³, 杨哲³, 邹书平³

(1. 成都信息工程大学大气科学学院气候与环境变化联合实验室, 四川 成都 610225; 2. 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, 江苏 南京 210044; 3. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550081)

摘要:为提高中国西南复杂地形区域雹暴预报水平,对该区域内一次典型雹暴过程中的地形作用、微物理过程及成雹机制进行系统分析,并采用全弹性三维对流云模式进行数值模拟。结果表明:(1)雹暴过程为冷空气侵入型,地形对低层暖湿气流的阻拦导致水汽的积累,同时高原槽引导的冷空气触发雹暴。(2)近地面层或500~300 hPa高度层的 $>8\times 10^{-5}/s$ 的涡度中心、750 hPa高度存在散度 $<-8\times 10^{-5}/s$ 的辐合中心且在500 hPa或以上层次转为辐散、近地面层水汽通量散度 $<-12\times 10^{-8}g/(s\cdot cm^2\cdot hPa)$ 、假相当位温梯度 $>4K/km$ 、0~6 km垂直风切变 $>15m/s$ 这几个阈值可以为西南复杂地形区域的雹暴过程提供预警。(3)32.03 m/s的强垂直风切变和旋转速度达19.85 m/s、厚度超3 km的强中气旋是降雹单体的主要维持机制。(4)雹胚主要由雪晶撞冻过冷雨滴产生,低密度霰在沉降过程中淞附云水和过冷雨滴增长成雹是主要的成雹机制。对贵州地区雹暴过程的预报具有一定指导作用。

关键词:雹暴;大气物理;云模式;微物理;地形作用

中图分类号:P401

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.01.013

0 引言

冰雹是常见的灾害性天气之一,造成巨大的经济损失,严重时甚至危及人们的生命安全。中国西南复杂地形区域——云贵高原,地形复杂,海拔较高,冰雹频发。为降低该地雹暴过程带来的灾害,需要对当地雹暴天气机理进行全面研究。

对雹暴过程的研究可分为观测和模拟两个方面。观测方面主要有雷达、飞机、卫星等观测手段,用以研究雹暴热动力、闪电特征及成雹机制^[1-12]。双偏振雷达及其质量控制技术的发展,结合水凝物分类算法(HCA)实现对雹云中各类降水粒子的识别,从而揭示雹暴演变过程中的微物理特征^[13]。许多学者对西南复杂地形区域雹暴过程的天气背景、热动力、微物理及闪电特征进行了分析^[14-16]。山区降雹通常存在显著的地形作用,有学者分析了西南复杂地形与冰雹分布之间的关系^[17-18],但没有将复杂地形与雷达回波单体各阶段的演变进行结合分析,复杂地形对雹云微物理、热动力过程的具体作用还不明确。

模式方面目前主要采用中尺度模式和云模式对雹暴过程进行模拟研究,云模式预报量更少,计算资源消

耗远低于中尺度模式,可以在低计算资源消耗的条件下达到较高的时间分辨率,是分析研究云微物理过程的重要方法。中国科学院大气物理研究所的学者最早在国内建立了一个完全弹性原始方程三维冰雹云数值模式,后来又得到了多位学者的改进^[19-21]。虽然已有部分学者利用数值模式模拟西南复杂地形区域雹暴过程,分析该地区雹云各阶段的热动力、微物理特征,从而得到冰雹的形成发展机制^[22-24],但这些研究没有将复杂地形与模拟云的演变进行结合分析,复杂地形与雹云各阶段演变的关系还有待研究。因此本文将结合地形作用、雷达观测和三维对流云模式模拟结果来分析西南复杂地形区域雹暴过程的成雹机制。

本文对西南复杂地形区域产生严重雹灾的2022年1月4日贵州惠水县典型单体雹暴过程进行了研究,降雹单体生命史较长,最大冰雹直径20 mm,最大降雹密度达400/m²,本次雹暴过程发生在山地、丘陵极多的云贵高原地区,该地区内雹暴过程频发,地形对雹暴过程的作用显著。

1 资料与方法

研究区域及各雷达、探空站点如图1所示。本文将利用双偏振雷达资料、常规观测资料、0.25°×0.25° ERA5再分析资料、ASTER GDEM V1(30 m)地形高程数据和三维冰雹云模式,从观测及模拟两方面入手,对本次雹暴过程中的微物理机制及地形作用进行分析。

收稿日期:2023-09-07

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0104);贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2022]一般206)、黔科合支撑[2023]一般193);四川省重点研发资助项目(2022YFS0545);云南省重点研发资助项目(202203AC100006)

通信作者:周筠珩. Email:zhouyj@cuit.edu.cn

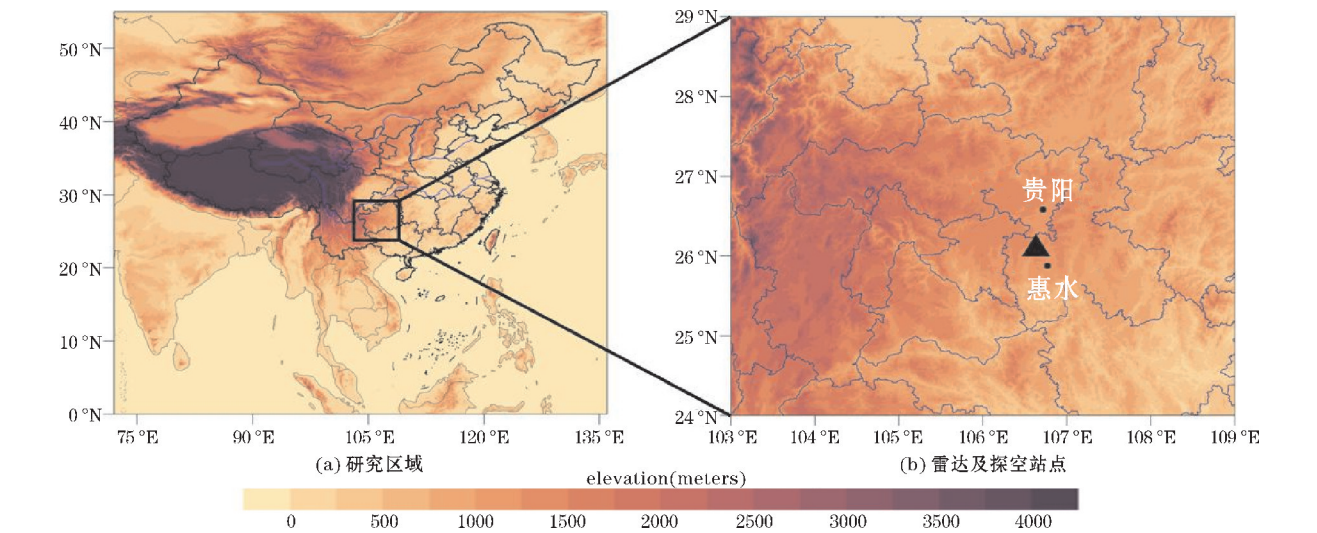


图1 研究区域及雷达站、探空站地理位置图(圆点代表雷达站,三角形为降雹点,惠水探空站和雷达站位置一致)

使用惠水地区的 X 波段双偏振雷达资料进行分析研究,采用综合小波去噪滤波法^[25]、自适应衰减订正和 Barnes 插值等方法对 X 波段双偏振雷达资料进行预处理,并采用模糊逻辑算法、不对称梯形隶属函数、最大集成法对水成物粒子进行识别。将识别结果分为毛毛雨(DR)、雨(RA)、冰晶聚合物(AG)、冰晶(CR)、低密度霰(LDG)、高密度霰(HDG)和冰雹(RH)7 种粒子。

1.1 自适应衰减订正效果验证

C 波段雷达波长较长,受降水的衰减作用较弱,因此本文利用 C 波段雷达回波来对 X 波段雷达回波的自适应衰减订正效果进行检验。如图 2 所示,X 波段双偏振雷达资料经过自适应衰减订正后的组合反射率强度及强回波区域面积都得到明显提高,与订正前的结果相比更接近 C 波段雷达的观测结果。

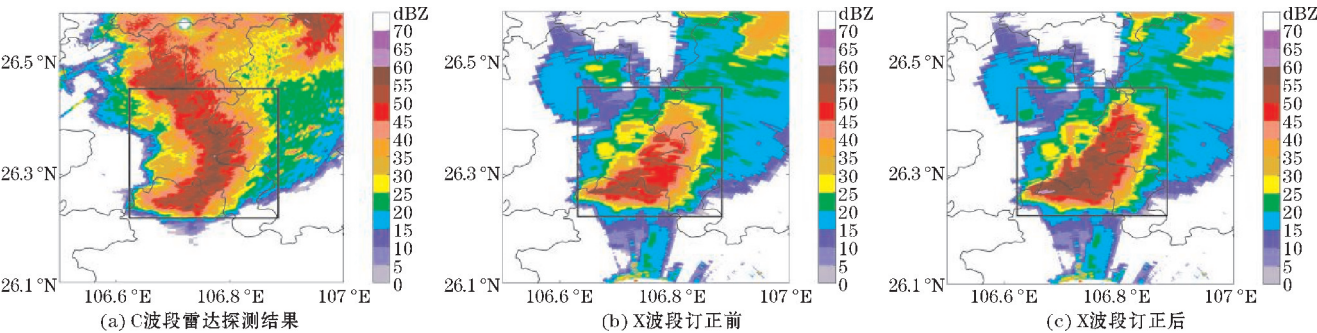


图2 2022 年 1 月 4 日 18:46 贵阳 C 波段雷达组合反射率、X 波段雷达自适应衰减订正前组合反射率、X 波段雷达自适应衰减订正后组合反射率

1.2 粒子识别结果验证

2022 年 1 月 4 日 18:46,水平及垂直粒子识别结果显示在贵阳花溪区近地面层有冰雹粒子出现。根据

地面降雹记录(图 3a ~ c),贵阳市花溪区在 18:41 ~ 18:47 存在降雹情况,粒子识别结果中出现降雹的时间、地点与地面观测站记录一致,验证了本研究中使用的

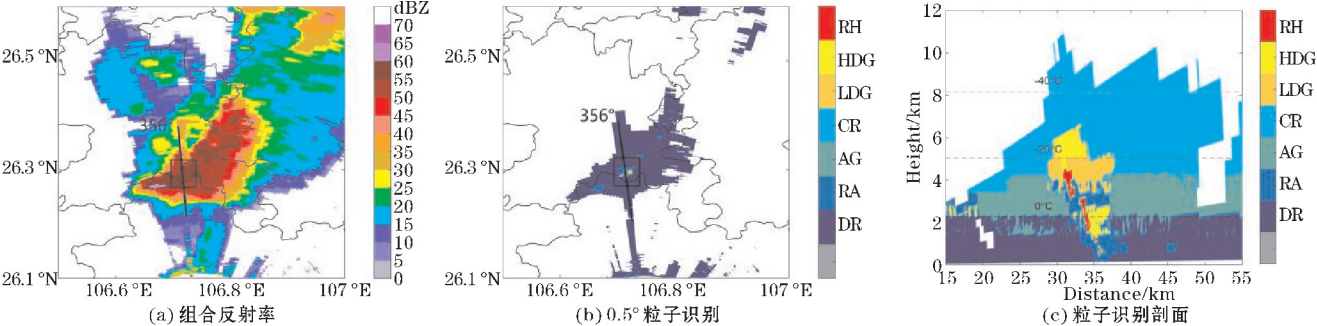


图3 2022 年 1 月 4 日 18:46 的组合反射率、0.5°仰角粒子识别结果、粒子识别垂直剖面图(黑色粗实线为垂直剖面图的剖面线)

1.3 云模式设置

使用由中国科学院大气物理研究所孔凡铀等^[19]研制的双参数谱三维全弹性冰雹云模式对研究的两个雹暴过程进行模拟,模式中动力框架、微物理过程参数化具体设置见文献^[19]。模式模拟区域大小为35 km×35 km×18.5 km,以 x,y,z 分别表示模拟域向东、向北、向上的格点序数,采用热泡启动方式,热泡扰动中心最大位温偏差为1℃,扰动中心坐标 $(x,y,z)=(18,18,4)$,扰动区域大小为5 km×5 km×4 km,整个模拟域跟随云体质心移动。

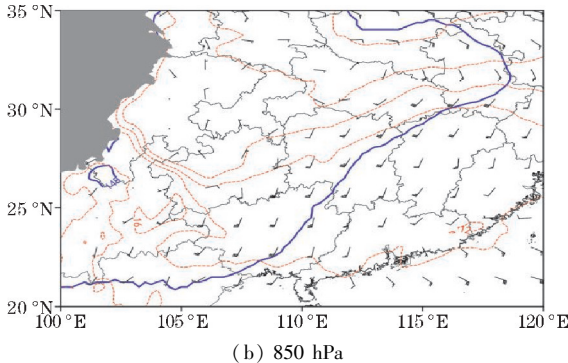
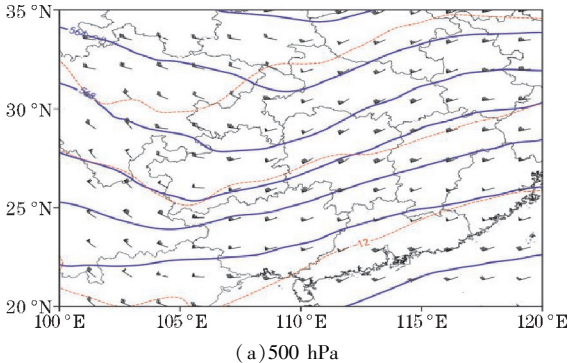


图4 2022年1月4日20时500 hPa,850 hPa形势场(蓝色实线为等高线,红色虚线为等温线,棕色实线为槽线,填色区域为高原阴影)

2.2 探空资料及物理量诊断分析

为提高西南复杂地形区域雹暴预报的准确率,本文对西南复杂地形区域的9次雹暴过程进行统计分析,选取具有指示意义的物理量进行诊断:利用涡度、散度及垂直风切变进行动力条件诊断;利用假相当位温进行热力条件诊断;利用水汽通量及水汽通量散度进行水汽条件诊断,最后得到该区域雹暴预报的相关

2 雹暴过程观测研究

2.1 天气背景

本次雹暴过程发生在高原槽引导冷空气南下的有利环流形势条件下。2022年1月4日20时,500 hPa有高原槽自西北方向移动至贵州地区,850 hPa有西南暖湿气流(图4)。高空槽后引导的西北冷空气先受地形作用抬升,再在下山过程中与低层的西南暖湿气流交汇,产生上冷下暖的不稳定结构,导致强对流天气产生。

阈值。

2.2.1 动力条件

以2022年1月4日惠水雹暴过程为例,涡度场上,高空槽向降雹地区输送正相对涡度,导致降雹点高空正涡度区加强,并且由于降雹点位于迎风坡,气流上升导致低层涡度较小,高低空形成较大的涡度差,有利于对流天气的产生发展。降雹前3 h内,涡度最大值超 $8\times10^{-5}/s$,降雹时段涡度最大值达 $16\times10^{-5}/s$ (图5)。

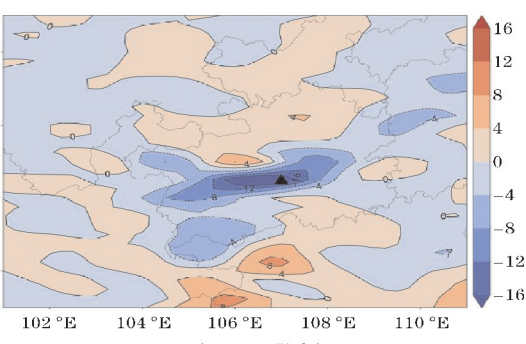
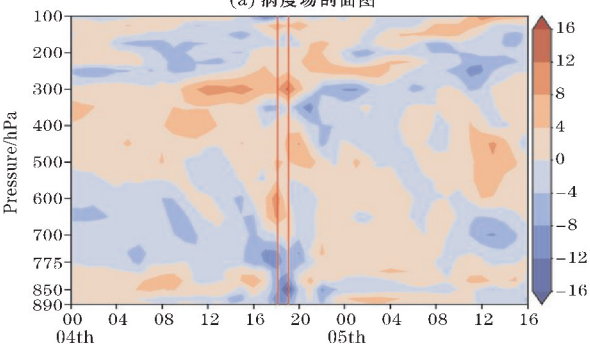
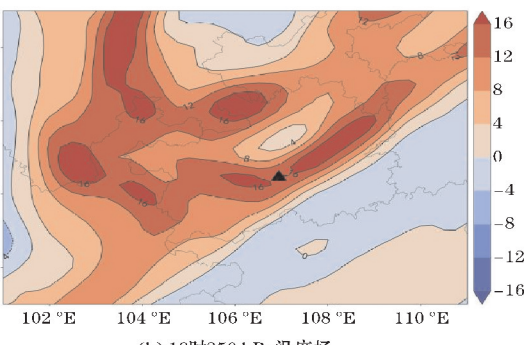
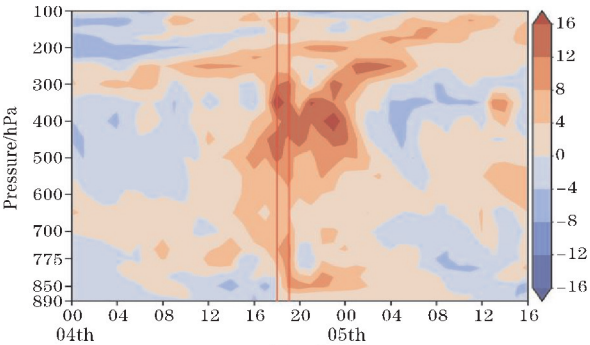


图5 惠水雹暴过程中的涡度场和散度场(图红色实线表示降雹时段、黑色三角形表示降雹点,剖面图绘制于降雹点)

散度场上,降雹点低层有强辐合中心,中高层转为辐散,低层辐合高层辐散的高低空配置为雹暴过程的产生发展提供了有利的动力条件。在降雹前3 h内,750 hPa散度值低于 $-8 \times 10^{-5}/s$,降雹时最低值达 $-16 \times 10^{-5}/s$ 。雹暴过程中降雹点位于迎风坡的位置,有利于低层辐合中心的产生发展(图5)。

对复杂地形区域发生的9个雹暴过程进行统计发现,在降雹前3 h有88.9%的过程涡度值 $>8 \times 10^{-5}/s$,所有过程750 hPa散度值 $<-8 \times 10^{-5}/s$,且中高层转为辐合。

强垂直风切变有利于形成组织化的对流风暴系统、水平涡度的积累以及水平涡度向垂直涡度的转换,使对流系统拥有更长的寿命。本文使用公式(1)计算垂直风切变 $|\Delta V|^{[26]}$,利用2022年1月4日20时贵阳站的探空资料计算从地面到400 hPa高度(离地高度约6 km)的垂直风切变,达32.03 m/s,属于强垂直风切变。在复杂地形区域发生的9个雹暴过程中,有88.9%的过程0~6 km垂直风切变 >15 m/s,达到中等垂直风切变强度。

$$|\Delta V| = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos D} \quad (1)$$

式中: V_1 为近地面层风速, V_2 为6 km高度层风速, D 为从地面到0~6 km高度层的风向差。

2.2.2 热力条件

图6为利用ERA5再分析资料绘制的假相当位温差值场,惠水雹暴过程中由于高层冷空气与低层西南暖湿气流汇合导致贵州南部大范围地区假相当位温差为负值,平均假相当位温梯度约4 K/km,表现出对流不稳定的形势。统计发现,在复杂地形区域发生的9个雹暴过程中66.7%的过程降雹点位于假相当位温差的负值区,77.8%的过程平均假相当位温梯度达4 K/km。

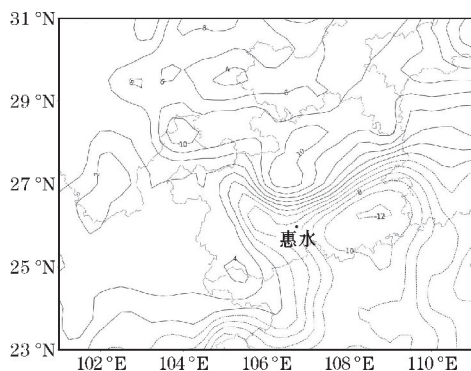


图6 2022年1月4日18时850 hPa与700 hPa假相当位温差值场

2.2.3 水汽条件

4日18时,因贵州中、西部海拔最高的地形条件,850 hPa西南暖湿气流受到中部山地阻拦,在南侧形成水汽通量散度的负值中心,最小值低于 $-14 \times 10^{-8} g/(s \cdot cm^2 \cdot hPa)$ (图7),虽然降雹点并非水汽通量的大

值中心,但西南气流从南方的水汽通量大值区将水汽向贵州输送,提供了较好的水汽条件。统计的9个雹暴过程中,88.9%的过程降雹点水汽通量散度 $<-12 \times 10^{-8} g/(s \cdot cm^2 \cdot hPa)$ 。

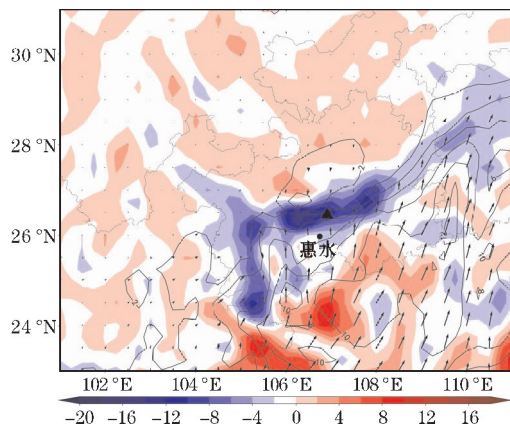


图7 18时850 hPa水汽通量(等值线)及水汽通量散度(填色图)
(黑色三角形为降雹点)

综上,可利用位于近地面层或500~300 hPa高度层的 $>8 \times 10^{-5}/s$ 的涡度中心、750 hPa高度存在散度 $<-8 \times 10^{-5}/s$ 的辐合中心且在500 hPa或以上层次转为辐散、近地面层水汽通量散度 $<-12 \times 10^{-8} g/(s \cdot cm^2 \cdot hPa)$ 、假相当位温梯度 >4 K/km、0~6 km垂直风切变 >15 m/s这几个阈值作为西南复杂地形区域雹暴过程的预警条件。

2.3 雹暴过程双偏振雷达观测

本次降雹过程发生于贵州省惠水县雅水镇附近,降雹单体持续时间较长。在雷达观测中,回波单体18:02进入雷达探测范围时已有一定程度发展,18:16雹云发展到成熟阶段,西北侧出现了V形缺口,雹暴的成熟阶段一直维持到19:08,持续时间近1 h,在此期间产生持续性降雹。19:15雹云进入消散阶段,但直到20:07雹云移出探测范围时其中心回波强度依然超过40 dBZ。

雹暴过程中降雹单体移动路径如图8所示。18:02发展阶段的回波单体经过地形抬升作用后,大量水汽凝结,在3~4 km高度形成过冷水累积带(supercooled raindrop accumulate zone, SRAZ),冰晶淞附过冷雨滴形成大量LDG粒子,为冰雹的形成提供雹胚(图9a、d、g)。18:31~18:46回波单体下垫面海拔明显降低,西北冷空气沿坡地向下流入山谷,18:46,回波单体位于山谷,冷空气使暖湿气流受迫抬升,水汽大量凝结,LDG淞附过冷水形成大量RH,此时回波单体组合反射率达到最强,产生降雹(图9b、e、h)。19:15回波单体处于消散阶段,冰雹沉降后回波强度显著降低,但由于此时回波单体上山,云体增强,有利于冰相粒子的

形成,因此云内依然有大量 LDG、HDG 粒子存在 (图 9c,f,i)。

回波单体内部中气旋部分特征演变如图 10 所示,18:02 回波单体处于发展阶段,此时单体内中气旋厚度约 2.3 km,18:16 单体发展成熟,中气旋的厚度增加至约 4.2 km,最强切变高度达 2.3 km,超过 0℃ 层高度 (2.2 km),有利于冰雹的生成增长。18:16–19:08,中气旋厚度大于等于对流风暴垂直尺度的 1/3,径向速度最大差值超过 30 m/s,最大旋转速度达 19.85 m/s,符合强中气旋的特征。虽然 18:31、18:46 因冰雹云下山,海拔显著降低,导致中气旋减弱,中气旋厚度较小,但单体内部的环流并未被彻底破坏,其最强切变高度始

终保持在 0℃ 层以上,径向速度的最大差值也维持高值。强烈的水平旋转气流有利于低层负压区的形成,加强对流风暴低层气流的流入,同时也部分抵消降水粒子的拖曳作用,使对流风暴的组织化程度更高,拥有较为稳定的结构,能长时间维持。

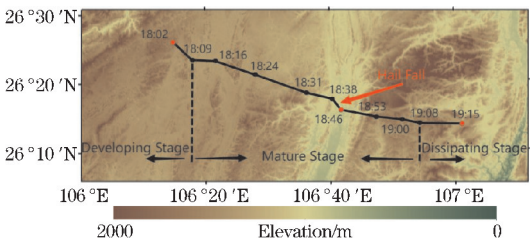


图 8 降雹单体移动路径(红点代表云模式模拟时段)

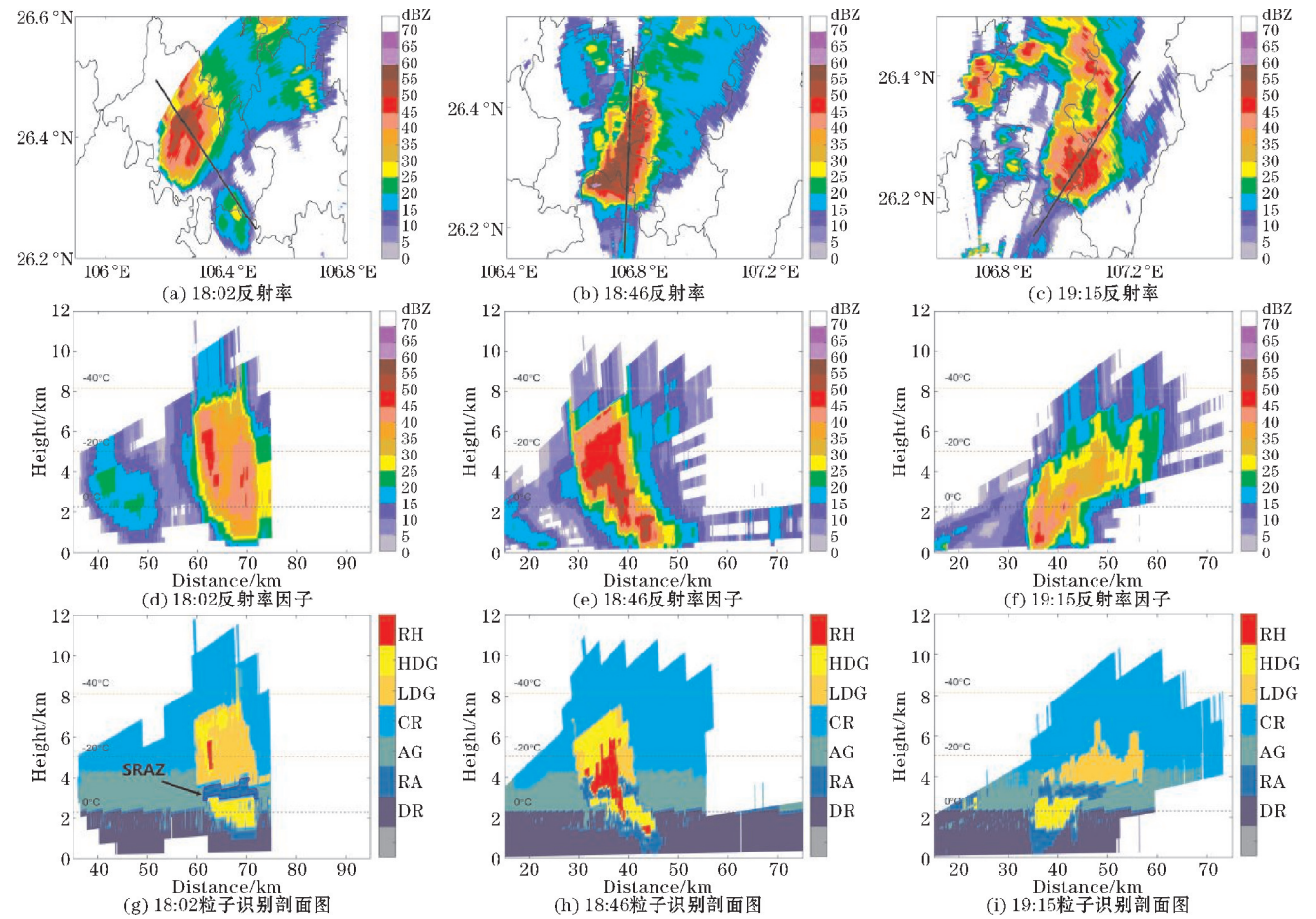


图 9 2022 年 1 月 4 日惠水雹暴过程 3 个时刻组合反射率图、反射率因子和粒子识别剖面图(组合反射率图中黑色实线为剖面图剖线)

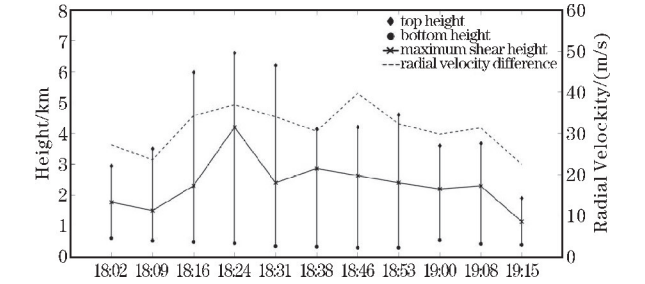


图 10 中气旋顶高、底高、最强切变高度和径向速度最大差值随时间变化图

3 雹暴过程云模式模拟研究

3.1 模拟各阶段特征

云模式模拟第 12 min 时,模拟云处于发展阶段,对应 18:02 的实际云体,地形抬升作用导致云中水汽抬升凝结,形成云水及过冷雨滴比含量大值区,过冷雨滴

比含量中心高度4 km,最大值超1.5 g/kg,冰晶撞冻过冷雨滴形成雹胚,比含量最大值1 g/kg(图11)。与实际观测结果相比,成功模拟出云体发展阶段中的累积

带特征,并且过冷雨滴的分布高度与实际观测结果一致,都集中在3~4 km高度。

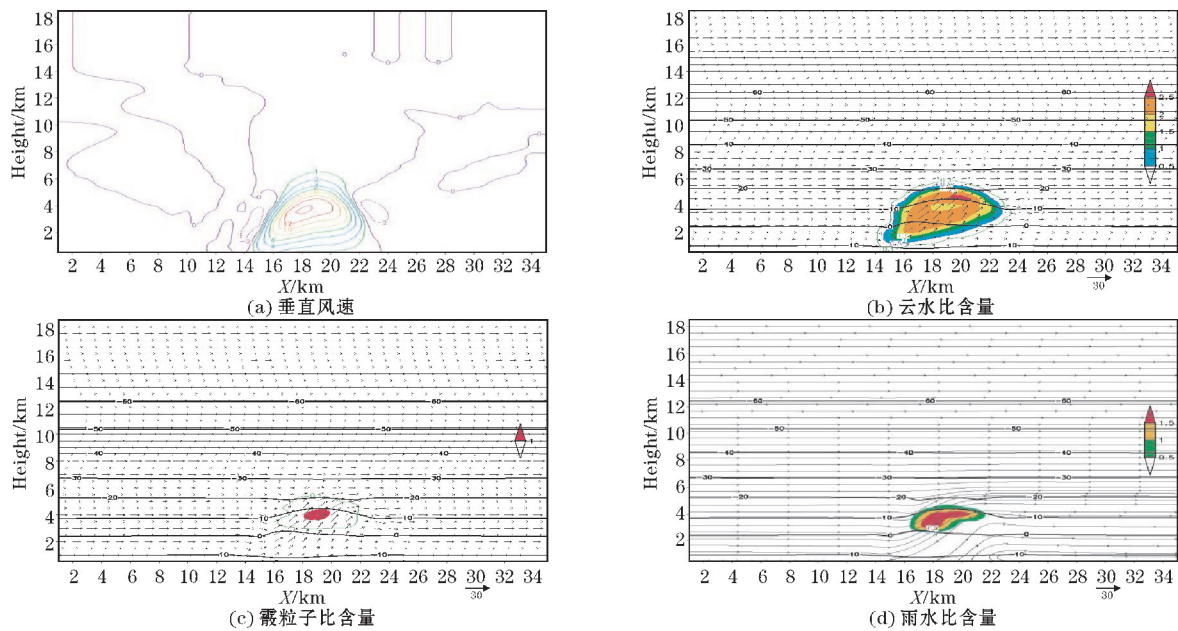


图11 第12 min模拟云垂直风速、云水、霰粒子、雨水比含量剖面图

云模式模拟第20 min,模拟云对应18:46成熟阶段的实际云体。此时雹云移动到山谷地区,高层冷空气抬升了低层暖湿气流,云水比含量提高至3.5 g/kg,大量过冷雨滴消耗形成雹胚,霰粒子比含量提高至

5 g/kg,霰胚碰并云水形成上下两个冰雹累积区(图12b~d)。冰雹粒子高空5 km大值中心、低空2 km大值中心的分布和霰粒子集中在6 km高度附近的分布情况与实际观测结果一致。

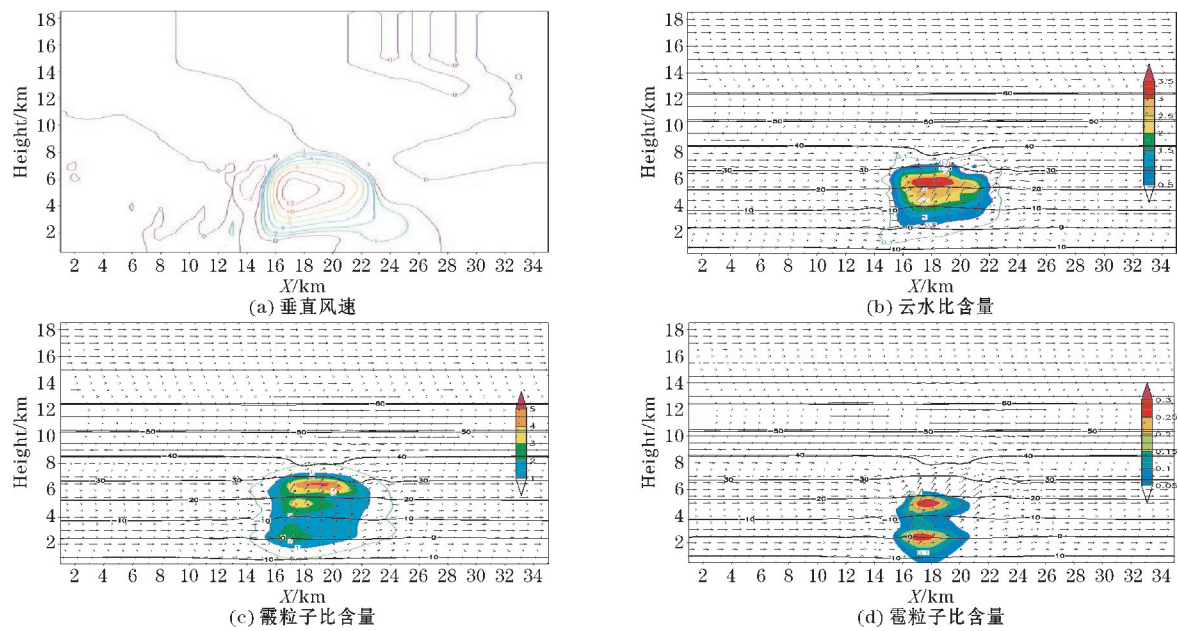


图12 第20 min模拟云垂直风速、云水、霰粒子、雹粒子比含量剖面图

云模式模拟第32 min,模拟云对应19:15消散阶段的云体。实际云体因地形爬升导致云中冰相粒子依然较多,模拟云中最大上升气流速度仅4 m/s,云水、霰粒

子的分布范围明显缩小,比含量值显著降低,总含水量最大值已降至5 g/kg(图13)。模拟云云顶高度及霰粒子大值区位于4~6 km的特征与实际观测结果一致。

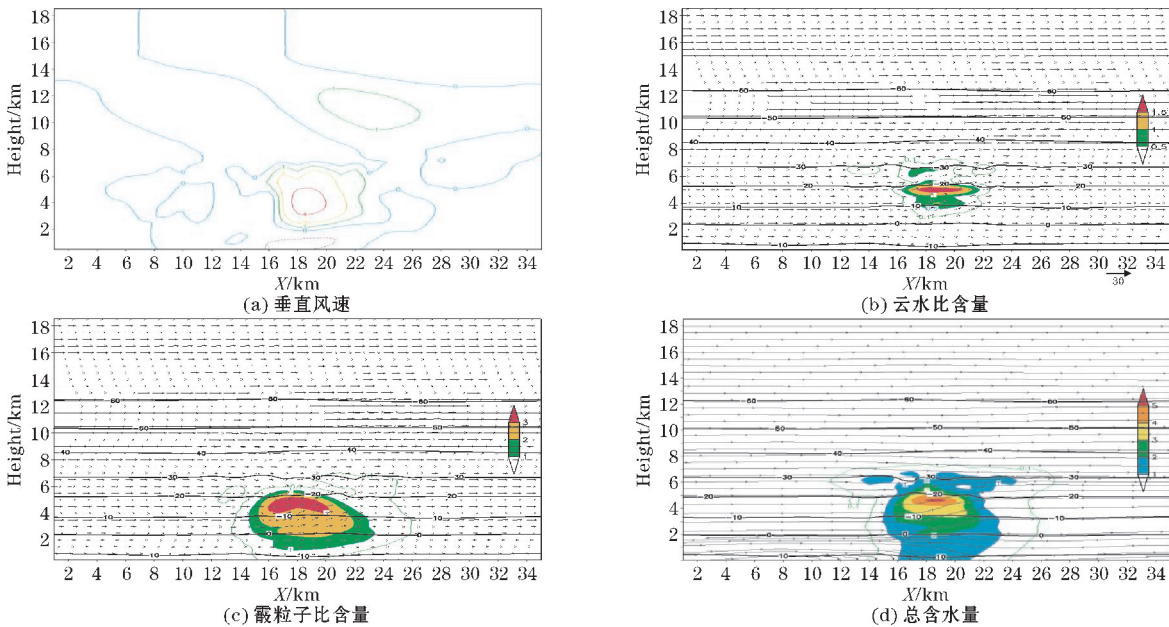


图 13 第 32 min 模拟云垂直风速、云水比含量、霰粒子比含量、总含水量

3.2 成雹机制分析

如图 14(a) 所示,云模式模拟中霰粒子主要通过雪晶撞冻过冷雨滴的过程产生 (CLrsg),少量来自冰晶撞冻过冷雨滴和雪的自主转化过程 (CLrig, CNsg), CLrig 主要发生在发展阶段。霰粒子的增长通过碰并云水、冰晶、过冷雨滴和凝华的方式实现 (CLcg, CLig, CLrg, VDvg),总产量分别达21.4 kt、28.99 kt、4.92 kt、23.01 kt。CLrg 主要发生在发展阶段 (10 ~ 14 min),该时段内 CLrg 对霰粒子增长的贡献占比超 20%。成熟阶段,霰粒子通过 CLcg、CLig、VDvg 过程增长,CLcg 主要发生在发展和成熟阶段 (9 ~ 22 min) 中,最大增长速率达2236.4 t/min。消散阶段,云水含量较小,霰粒子的增长主要依赖 CLig 和 VDvg 过程。

图 14(b) 为模拟过程中各微物理过程中雹生成增长速度随时间变化图,包括霰粒子的自主转化过程 (CNgh),雹粒子碰并冰晶、云水、雪、霰和雨水的过程 (CLih、CLch、CLsh、CLgh、CLrh)。结果表明,冰雹主要通过 CNgh 产生,在绝大多数时段里,该过程对冰雹生成增长的贡献占比超过 80%。冰雹的增长过程主要在发展和成熟阶段中 (9 ~ 20 min),与模拟中垂直速度大值出现的时段吻合,通过 CLch、CLgh 过程实现,该时间段内较大的上升速度促进了过冷云水形成,与雹粒子发生碰并使其增长,CLch、CLgh 最大增长速率分别达24.42 t/min、8.67 t/min。

结合前文分析,本次雹暴过程中地形对暖湿气流的阻挡导致低层水汽的积累,高层冷空气的输送形成

上冷下暖的不稳定结构,触发雹暴,降雹单体中霰胚主要通过雪撞冻过冷雨滴的方式产生,在雹云沿地形下降过程中,低层暖湿气流被冷空气抬升导致大量水汽凝结,增加云水、过冷雨滴的含量,提高霰胚碰并云水、过冷雨滴的效率,有利于霰粒子的增长,从而自主转化形成雹粒子。

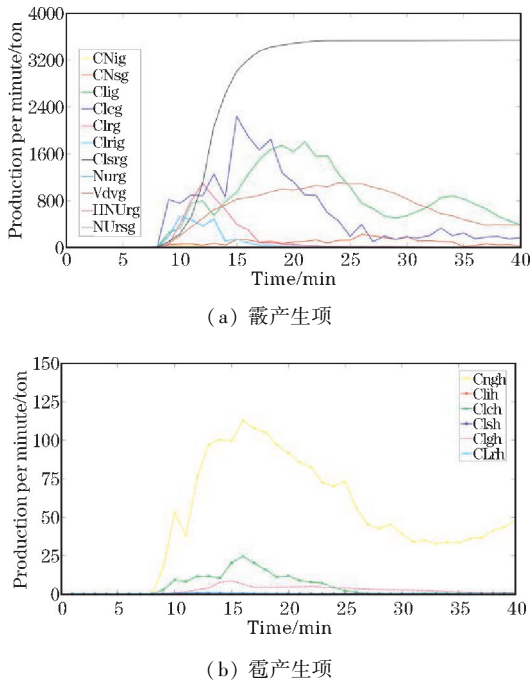


图 14 模拟云霰产生项、雹产生项随时间变化图

4 总结与讨论

有学者利用数值模式研究西南复杂地形区域的多

单体雹暴过程^[24],探讨大尺度地形通过地形阻挡、强迫抬升作用来触发雹暴过程,并指出多单体合并后,高密度霰撞冻过冷水是主要的成雹机制。而本文将小尺度地形与雹云的微物理、热动力特征结合分析,指出复杂地形对雹云各阶段微物理、热动力过程的具体作用,同时利用三维对流云模式分析该地区雹暴过程的成雹机制,结果表明本次雹暴过程中,低密度霰淞附云水及过冷雨滴是主要成雹机制。

本文研究西南复杂地形区域里发生的长生命史单体雹暴过程,通过对观测资料的分析得到该地区雹暴过程发生的环流形势和物理量场特征、地形作用及微物理机制,并通过对三维云模式模拟分析雹暴过程的成雹机制,具体结论如下:

(1)本次雹暴过程为冷空气侵入型雹暴,高空槽东移引导西北冷空气南下,低层地形对西南暖湿气流的阻拦导致水汽在山地南侧积累,冷空气翻越山坡后与低层暖湿气流交汇触发了本次雹暴。

(2)近地面层或500~300 hPa高度层的 $>8\times 10^{-5}/s$ 的涡度中心、750 hPa高度存在散度 $<-8\times 10^{-5}/s$ 的辐合中心且在500 hPa或以上层次转为辐散、近地面层水汽通量散度 $<-12\times 10^{-8}g/(s\cdot cm^2\cdot hPa)$ 、假相当位温梯度 $>4 K/km$ 、0~6 km垂直风切变 $>15 m/s$ 这几个阈值可以为西南复杂地形区域的雹暴过程提供预警。

(3)32.03 m/s的强垂直风切变和旋转速度达19.85 m/s、厚度超3 km的强中气旋是本次雹暴过程中单体的主要维持机制,使单体能源源不断地从周围环境中获取能量,形成组织化的对流,从而延长单体寿命。

(4)本次雹暴过程为长生命史单体雹暴过程,降雹时,高层冷空气下沉,使低层被地形阻拦的暖湿空气抬升,使云中水汽凝结,形成大量云水及过冷雨滴。雪晶撞冻过冷雨滴是霰胚的主要形成机制,低密度霰在下降过程中淞附云水和过冷雨滴增长成雹是主要的成雹机制,云水、过冷雨滴贡献占比分别为78%、22%。

虽然本文对发生在中国西南复杂地形区域的典型雹暴过程进行了具体分析,获得该区域内雹暴过程的预警条件、地形作用、长生命史单体雹暴的成雹机制。但因分析研究的个例数量有限,对研究结果是否为研究区域内雹暴过程的共性仍需要分析研究更多的雹暴过程来验证。

参考文献:

- [1] Browning K A, Ludlam F H. Airflow in convective storms[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1962, 88: 117-135.
- [2] Browning K A, Foote G B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102: 499-533.
- [3] Kennedy P C, Detwiler A G. A case study of the origin of hail in a multicell thunderstorm using in situ aircraft and polarimetric radar data[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42: 1679-1690.
- [4] Foote G B, Wade C G. Case study of a hailstorm in Colorado. Part I: Radar echo structure and evolution[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1982, 39: 2828-2846.
- [5] Foote G B, Frank H W. Case study of a hailstorm in Colorado. Part III: Airflow from triple-doppler measurements[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1983, 40: 686-707.
- [6] 杨颂禧, 刘棠福, 龚乃虎, 等. 一次雹暴回波和电块微结构分析[J]. 大气科学, 1981(2): 157-165.
- [7] 王昂生, 徐乃璋. 强单体雹暴的研究[J]. 大气科学, 1985(3): 260-267.
- [8] 张鸿发, 左洪超, 郝秀书, 等. 平凉冰雹云回波特征分析[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 110-115.
- [9] 周筠珺, 张义军, 郝秀书, 等. 陇东地区冰雹云系发展演变与其地闪的关系[J]. 高原气象, 1999, 18(2): 236-244.
- [10] 冯桂力, 郝秀书, 吴书君. 山东地区冰雹云的闪电活动特征[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 289-299.
- [11] Xie Y R, Wu J, Liu X T, et al. Characteristics of cloud-to-ground lightning activity in hailstorms over Yunnan province[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2015, 136: 2-7.
- [12] 孙萌宇, 郝秀书, 王东方, 等. 北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征[J]. 大气科学, 2020, 44(3): 601-610.
- [13] 郝秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 大气探测高技术及应用研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 867-880.
- [14] 张腾飞, 张杰, 张思豆, 等. 云南南支槽胞线雹暴中尺度特征及环境条件[J]. 高原气象, 2018(4): 958-969.
- [15] 黄海迅, 周筠珺, 曾勇, 等. 基于X波段双线偏

- 振雷达的贵州威宁雹胚演变特征研究[J]. 大气科学, 2021(3): 539-557.
- [16] 刘霭薇, 周筠珺, 曾勇, 等. 孤立单体爆发性增长过程中的宏微观物理特征研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2022, 37(5): 574-583.
- [17] 杨洋, 刘益兰. 中 β 尺度地形与贵州冰雹和暴雨的关系[J]. 高原气象, 1997(2): 86-92.
- [18] 王瑾, 刘黎平. 基于GIS的贵州省冰雹分布与地形因子关系分析[J]. 应用气象学报, 2008(5): 627-634.
- [19] 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值模拟——I: 模式建立及冷云参数化[J]. 大气科学, 1990(4): 441-453.
- [20] 洪廷超. 积层混合云数值模拟研究(I)——模式及其微物理过程参数化[J]. 气象学报, 1996(5): 544-557.
- [21] 肖辉, 崔雅琴, 周丽娜, 等. IAP-CSM3D 催化模式人工冰晶参数化方案的改进[C]. 中国气象学会人工影响天气委员会. 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集(I). 气象出版社, 2008: 376-379.
- [22] Zhang S, Liu S, Zhang T. Analysis on the Evolution and Microphysical Characteristics of Two Consecutive Hailstorms in Spring in Yunnan, China[J]. Atmosphere, 2021, 12(1): 63.
- [23] 张小娟, 陶玥, 刘国强. 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, 2019(3): 415-425.
- [24] 周峰, 周筠珺, 邹书平, 等. 基于双偏振雷达对一次多单体雹暴微物理特征的观测及数值模拟研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2021, 36(6): 655-665.
- [25] 赵川鸿, 周筠珺, 肖辉, 等. X波段双线偏振多普勒雷达共极化差分相移资料的滤波方法研究[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 285-296.
- [26] 徐芬, 郑媛媛, 肖卉, 等. 江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J]. 气象, 2016, 42(5): 567-577.

Observation and Simulation Study of a Hail Storm Process in a Complex Terrain Area

REN Xinru¹, ZHOU Yunjun^{1,2}, LUO Xiping³, ZENG Yong³, YANG Zhe³, ZOU Shuping³

(1. College of Atmospheric Sciences, Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Guizhou Province Weather Influencing Office, Guiyang 550081, China)

Abstract: To improve the forecasting level of hailstorms in the southwestern complex terrain region of China, this paper systematically analyzes the terrain effect, microphysical process, and the mechanism of hail formation during a typical hailstorm in the southwestern complex terrain region of China, and numerically simulates it by using the fully elastic three-dimensional convective cloud model. The results show that: (1) this hailstorm process is a cold air intrusion type hailstorm, and the terrain's obstruction of the low-level warm and humid airflow led to the accumulation of water vapor, while the cold air guided by the plateau trough triggered this hailstorm. (2) The existence of vorticity centers greater than $8 \times 10^{-5}/s$ in the near-surface layer or 500 ~ 300 hPa altitude layer, the existence of convergence centers with dispersion less than $-8 \times 10^{-5}/s$ at 750 hPa altitude and turning into convergence dispersion at the level of 500 hPa or above, the near-surface water vapor flux dispersion greater than -12×10^{-8} , the pseudo-equivalent temperature gradient greater than 4 K/km, and the vertical windshear greater than 15 m/s at the 0-6 km altitude are some of the thresholds that can provide early warnings for the hailstorms in the southwestern region of the complex terrain. (3) The strong vertical wind shear of 32.03 m/s and the strong medium cyclone with a rotational speed of 19.85 m/s and a thickness of more than 3 km are the main maintenance mechanisms of the hail monomer. (4) Hail embryos are mainly produced by snow crystals hitting frozen supercooled raindrops, and low-density shrapnel is the main hail formation mechanism in the process of precipitation of freezing attached cloud water and supercooled raindrops to grow into hail. The results of the study have a certain guiding effect on the forecasting of hailstorm processes in Guizhou and analyze the topographic effects.

Keywords: hailstorm; atmospheric physics; cloud model; microphysics; terrain effect