

冰雹云卫星早期识别与自动预警

徐小红¹ 余兴¹ 刘贵华¹ 岳治国² 朱延年¹

¹ 陕西省气象科学研究所, 西安 710016

² 陕西省人工影响天气办公室, 西安 710016

摘要 利用陕西、山东、贵州和新疆等地近十年日间降雹记录 and 对应极轨卫星数据, 采用卫星云微物理反演技术, 定量分析冰雹云微物理特征, 比较不同地区间差异, 并利用 FY-4A 静止卫星定量分析一次冰雹过程云微物理特征演变, 探讨冰雹云卫星识别预警应用潜力。结果表明: (1) 陕西、山东等地冰雹云微物理特征具有一致性, 卫星早期识别指标为: 晶化温度 (T_g) 较冷, 均值为 -33°C ; 全部冰晶化时 T_g 对应的云粒子有效半径 r_e (表征为 r_{e-g}) 未饱和 ($<40\mu\text{m}$), 均值 $36.9\mu\text{m}$, 且 r_{e-g} 越小冰雹云越强; 云顶呈现 r_e 随高度减小带。(2) 各地冰雹云早期识别指标在数值上存在一定差异, 实际应用时应针对各地进行相应调整。(3) 在静止卫星上, 冰雹云微物理特征与极轨卫星相一致, 将早期识别指标应用于 FY-4A 静止卫星, 跟踪云团发展演变, 实现自动预警。(4) 经过 4 次降雹过程中应用, FY-4A 卫星自动预警与实况吻合 22 次, 漏报 2 次, 自动预警平均提前约 2 小时。FY-4A 卫星自动预警对及时有效组织实施人工防雹作业具有重要现实意义。

关键词 冰雹云 云微物理特征 FY-4A 静止卫星 卫星早期识别 自动预警

文章编号 2021010B

中图分类号 P482

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Research on Early Identification and Automatic Warning of Hail Clouds by Satellite

XU Xiaohong¹, YU Xing¹, LIU Guihua¹,

YUE Zhiguo², and ZHU Yannian¹

¹ Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710016

² Weather Modification Office of Shaanxi Province, Xi'an 710016

收稿日期 2021-01-21; 网络预出版日期

作者简介 徐小红, 女, 1971 年出生, 硕士, 高工, 主要从事云降水和人工影响天气研究。

E-mail: xu_xiaohong16@163.com

通讯作者 余兴, E-mail: yu_xing23@163.com

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507903, 中国气象局西北区域人影科学试验项目 RYSY201905, 陕西省重点研发计划项目 2020SF-429, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2021J040

Funded by National Key R&D Program of China(Grant 2018YFC1507903), Northwest Weather Modification Scientific Experiment of CMA(Grant RYSY201905), Key R&D Program of Shaanxi Province(Grant 2020SF-429), Innovation and Development Project of CMA(Grant CXFZ2021J040)

Abstract Meteorological satellites have provided useful information for improving weather forecasting, environmental monitoring and short-term climate prediction. In the field of weather forecast, it provides a more powerful means for the forecast of typhoon, rainstorm, hail, sandstorm and other severe weather. In this study, the microstructure of hail clouds were analysed by satellite observation data based on nearly a decade of hail events record of Shaanxi, Shandong, Guizhou, and Xinjiang. The comparison between the hail cloud and deep convective precipitation cloud characteristics which retrieved by polar orbit satellites shown different cloud properties such as cloud top temperature/effective radius, cloud glaciation temperatures. Based on the distinct cloud properties between hail clouds and convective clouds, we summarized the characteristics and further apply them on the FY-4A geo-stationary satellite which captures the life cycle of hail which happened on August 16, 2019, Shandong area. The results shown satellite has the potential to capture a hail cloud during its developing stage and use it as an application of early warning. The hail cloud shows the following characteristics: (1) There are significant differences in cloud physical characteristics between hail clouds and deep convective precipitation clouds. The cloud microphysical characteristics of hail clouds observed by satellites are shown in three aspects: T_g is cooler, with an average value of -33°C . The hail cloud reaches glaciation temperature with smaller effective radius ($<40\text{mm}$) with an average of $36.9\mu\text{m}$ when the clouds are fully glaciated. It also shows the smaller the r_{e-g} was, the stronger the hail cloud was. Additionally, hail clouds tops often have a reduction zone of r_e with increasing height. (2) All the studied areas have consistent cloud properties such as lower T_g , smaller r_{e-g} and decreased r_e at in comparison to adjacent convective clouds. However, it still showed regional variabilities which indicates we should establish different indicators for identifying hail clouds for early warning purpose. (3) The case study of FY-4A geo-stationary satellite shows geostationary satellite can track the evolution of hail clouds. By tracking the hail cloud, we found the geostationary satellite has a response consistent with that of the polar orbit satellite, providing a method for monitoring and early warning service of hail weather. The geostationary satellite can be used to track the development and evolution of the cloud cluster, at any time when the satellite detects strong hail signal because of the high time resolution. Combining satellite early warning with radar observation, the location of hail occurrence can be determined precisely. (4) Combining the indicators summarized by polar orbit satellites with FY-4A to track hail cloud evolution. Four hail storms occurred in Shaanxi and Shandong were applied for early warnings. Ground observations reported 22 hail events in the two regions, of which the satellite successfully warned 20 times in advance and missed two times. The average early warning time is about two hours before the hail disaster. All those suggest that the automatic warning of hail by FY-4A satellite has important practical significance for timely and effective organization and implementation of operational hail mitigation.

Keywords Hail cloud, Cloud properties, FY-4A, Early identification, Automatic warning

1 引言

冰雹是由强对流所引发的剧烈天气现象，我国每年冰雹频发，是世界上四大冰雹多发地区之一。由于冰雹过程具有突发性、局地性特点，且生命期短，提前预警的难度较大，常给农业、通讯、电力、建筑、交通以及人民生命财产等造成

严重影响。为了减小冰雹灾害损失，各级政府非常重视人工防雹工作。众所周知，人工防雹的关键是早识别和早作业，那么对冰雹云的早期识别和提前预警显得特别重要。

随着多普勒天气雷达探测技术的发展，雷达探测资料在冰雹等强对流天气的临近预报中得到广泛应用。基于地基雷达观测，国内外众多学者开展了大量研究工作，分析了冰雹云雷达回波、径向速度场等特征（张鸿发等，2002；俞小鼎等，2005；廖玉芳等，2007；胡胜等，2015；王洪等，2018；范皓等，2019；王研峰等，2019；王易等，2019），据此发展冰雹云识别技术方法（龚乃虎和蔡启铭，1982；Amburn and Wolf, 1997；Zhang and Fang, 2004；朱敏华等，2006；吴剑坤和俞小鼎，2009；汤兴芝和黄兴友，2009；王俊等，2011；Skripniková and Řezáčová, 2013；张磊等，2014；夏文梅等，2016；杨淑华等，2019；张文海和李磊，2019），有效提高了冰雹临近预报能力。此外，也有很多学者采用三维冰雹云模式、中尺度数值模式（WRF）等开展了冰雹云微物理结构、形成机制、发展演变和降水过程等的模拟研究（郭学良等，2001a, 2001b；洪延超等，2002；康风琴等，2004；蒋瑛等，2016；付焯等，2016；张小娟等，2019），以及气溶胶数浓度改变对雹云微物理特性和降水过程影响的模拟研究（杨慧玲等，2011）。从气候统计角度，赵文慧等（2019）利用中国区域 55 年地面观测资料分析了冰雹持续时间的空间分布、年际以及日变化等特征，薛晓颖等（2019）通过分析中国近 55 年中小尺度强对流的天气气候学特征指出，我国冰雹出现频率随海拔高度增加而明显增加，地势高度对冰雹天气形成和发展具有重要影响。

目前，基于天气雷达的冰雹云临近预报是主要业务手段。但是受地形条件及雷达观测组网等因素影响，一些冰雹过程不在雷达有效探测范围内，存在探测盲区，形成了冰雹临近预警的盲区。再者，测雨雷达是利用云团中大粒子（雨、霰、雹等）特征进行监测预警，虽然准确性较高，但时效性不强。一旦雷达出现冰雹云回波特征，通常地面会很快降雹，造成防雹作业的响应时间太短，容易错失防雹时机。卫星因其资料覆盖范围广和时空分辨率高，能够对对流云团的发生和发展演变进行密集的跟踪观测，同时卫星又是利用云团中小粒子（云）特征进行监测预警，而云粒子特征总是要早于雨（冰）粒子的出现。因此，应用卫星探测进行冰雹云早期识别和提前预警具有较好的潜力。

自 20 世纪 70 年代起，学者们开始运用卫星资料研究冰雹云特征（David，

1980)。张杰等(2004a, 2004b)利用 NOAA 卫星资料统计分析了西北地区东部冰雹云的光谱特征,通过云顶温度和温度水平梯度等分析了冰雹云的演变特征。蓝渝等(2014)通过 FY-2E 卫星资料分析了冰雹发生时云顶的亮温特征,研究指出,较高的对流云顶并非冰雹出现的必要条件,而当冰雹云同时具备低云顶亮温和大亮温梯度时,更利于大于 10mm 的大冰雹发生。宋强等(2019)利用 TRMM 卫星产品,分析了一次冰雹过程中降水结构和闪电活动特征。

随着卫星技术发展和探测能力提高,云微物理卫星反演技术已经广泛用于人工影响天气和云降水物理等方面的研究。Adler and Mack (1986)利用可见光和 10-12.5 μm 通道资料,分析了雷暴云云砧、过顶现象和云顶温度分布等特征。Lindsey et al. (2006)通过 GOES 卫星 3.9 μm 和 10.7 μm 的组合资料,讨论了雷暴云顶 3.9 μm 反射率和云顶小冰晶、上升速度的关系,以期获得云粒子有效半径在预报业务中应用。Rosenfeld et al. (2008)利用卫星资料,分析了冰雹等强风暴垂直特征,表明卫星识别冰雹云的提前量可望达到 2 小时。俞小鼎和郑永光(2020)研究指出,利用高分辨率静止卫星多通道红外云图组合来判断初生的深厚湿对流,比雷达回波识别提前 10~30 分钟。覃丹宇和方宗义(2014)通过多光谱综合分析,判识云的微物理特征变化,从而捕捉初生对流。也有一些研究(刘京华等, 2012; 郭巍等, 2018; 周鑫等, 2019)基于日本葵花或我国 FY-2 静止卫星的多通道红外亮温数据及其随时间的变化,提取出多个指标来综合识别初生对流。徐小红等(2012, 2018)通过 NOAA 及 FY-2G 卫星资料分析了强飏线和龙卷过程对流云微物理特征和识别强对流的卫星强信号。

尽管冰雹云识别预警研究取得了丰硕成果,但大多是以雷达观测研究为主,应用卫星探测进行的研究较为有限,且多是围绕云顶亮温开展的,而对于应用云粒子有效半径(r_e)随温度(T)变化曲线(T - r_e 廓线)来进行冰雹云微物理特征定量分析、进而开展冰雹云早期识别的研究则更少。因此,本文基于陕西、山东、贵州、新疆等地多年地面降雹实况记录和卫星数据,通过极轨卫星云物理定量分析,归纳冰雹云微物理特征,获得早期识别指标,并将所得指标应用于 FY-4A 静止卫星上,跟踪云团演变,实现对冰雹云的自动预警。通过 4 个个例分析,检验卫星自动预警技术的可行性和可靠性,探讨卫星技术在人工防雹中的应用潜力。

2 数据和方法

2.1 数据

极轨卫星数据使用地球观测系统 (EOS) AQUA 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、NPP (National Polar-orbiting Partnership) 卫星搭载的可见光红外成像辐射仪 (Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS) 和 FY-3D 搭载的中分辨率光谱成像仪 (Medium Resolution Spectral Imager, MERSI) 的 LIB 数据, 星下点分辨率分别为 1km、0.375km 和 1km, 波段范围为可见光至远红外。

静止卫星数据采用 FY-4A 搭载的多通道扫描成像辐射计 (AGRI) LIB 数据。AGRI 传感器包括可见光和红外通道共 14 个, 可见光和近红外波段空间分辨率为 0.5~1km, 红外波段为 2~4km, 在中国区域扫描时间间隔约为 5min。

降雹实况记录由山东省人工影响天气办公室和陕西省人工影响天气中心提供。

2.2 基于 $T-r_e$ 廓线的云微物理特征分析方法

卫星探测只能获取云顶的信息, 为了了解云内状况, Rosenfeld and Lensky (1998) 提出了基于卫星反演技术的云微物理分析方法, 即通过各态历经假定进行时、空转换, 用一定空间范围内不同发展高度的对流云簇顶部的温度 (T) 和粒子有效半径 (r_e), 近似代替云团内不同发展高度上的 T 和 r_e , 从而得到该区域对流云团内部 r_e 随高度 T 的变化曲线, 即 $T-r_e$ 廓线。云粒子有效半径 r_e 可以通过中红外 3.7 μm 波段测得的辐射量反演获得, 假定像元视场内布满均一性质的云, 利用辐射传输模式 (Nakajima and King, 1990), 以及 3.7 μm 通道云反射率和视场几何数据 (像元经纬度、太阳和卫星天顶角、太阳卫星相对方位角), 计算得到 r_e 。云顶温度 (T_{top}) 通过 11 μm 通道辐射亮温经过水汽订正获得。晶化温度 (T_g) 是指云团中所有液态滴完全冰晶化的温度, -40 $^{\circ}\text{C}$ 为同质冻结温度, 即 T_g 的上限。这些可用于分析对流云团的微物理特征。

采用 MODIS、NPP/VIIRS、FY-3D/MERSI 和 FY-4A/AGRI 探测数据, 通过反演得到对流云团 $T-r_e$ 廓线, 通过对 T_{top} 、 T_g 和对应的 r_e 等云微物理定量分析,

归纳冰雹云微物理特征，用于冰雹云早期识别和自动预警。

云顶 r_e 随云顶温度的增长速率对强对流发生、发展具有较好的指示意义 (Adler and Fenn, 1979)。Rosenfeld et al. (2008) 对强对流风暴的研究指出，上升速度越大， T_g 越冷，对应的粒子有效半径 (r_{e-g}) 也越小。升速增大，强上升气流能在较短时间内把低层云粒子快速带到高层 (较低温度处)，冰水混合相和冰相增长时间缩短，云粒子增长减缓， T_g 较冷。强对流表现出的另一特征，在 $T-r_e$ 廓线的上部存在 r_e 随 T 减小的递减带，Setvak et al. (2003) 通过 GOES 卫星 $3.9\mu\text{m}$ 反射率研究也表明了这一点，强对流风暴云顶反射率越大，云顶强上升区附近的冰晶粒子相对较小。徐小红等 (2012, 2018) 对灾害性强对流天气个例的研究指出，飑线和龙卷等强对流云团均出现了这类强对流云微物理特征。

对冰雹云的早期识别，关键是找出强对流云团初生时强信号。利用极轨卫星云微物理反演技术，通过大量冰雹个例，定量分析冰雹云 T_{top} 、 T_g 、 $r_{e-\text{top}}$ 和 r_{e-g} 等特征，找出共性特点，归纳卫星早期识别指标，应用到冰雹云早期识别和自动预警中。

3 结果分析

3.1 极轨卫星探测冰雹云微物理特征

收集陕西、山东、贵州、新疆和河南等地近十年日间冰雹天气过程，通过降雹时间与 Aqua、NPP 或 FY-3D 卫星过境时间匹配，筛选出 31 个例，同时选取与冰雹云临近区域的深对流降水云个例 24 个，对比分析两类云的微物理特征差异，归纳冰雹云卫星云物理特征和早期识别指标。

选取个例须满足以下条件：①卫星过境时间早于降雹时间；② $T-r_e$ 分析云区的卫星天顶角 (天顶线与所在地与卫星连线之间的夹角，星下点卫星天顶角近似为 0，边缘最大) 在 $-20^\circ\sim 50^\circ$ 范围，以确保反演精度；③反演的 $T-r_e$ 廓线包含云低层信息。在此基础上，通过卫星云物理反演得到各个例 $T-r_e$ 廓线 (图 1a)，以及 T_{top} 、 T_g 、 $r_{e-\text{top}}$ 和 r_{e-g} 等物理参量值，进行统计分析。

3.1.1 冰雹云与深对流降水云对比分析

根据降雹实况记录，冰雹直径为 5~75mm。直径小于 10mm 占 19%，直径为

10~30mm 占 49%，大于 30mm 占 32%，个例中以成灾冰雹为主，这也是人工防雹重点。选取冰雹云临近区域的深对流降水云，对比分析云微物理特征。

图 1 为冰雹云和深对流降水云的 $T-r_e$ 分布特征及 T_{top} 和 T_g 的均值和偏差图。从图 1a 可以看出，两类强对流云的 $T-r_e$ 分布特征存在较明显差异，深对流降水云云粒子随温度降低增长相对较快，在大约 -30°C 时 r_e 达到 $40\mu\text{m}$ ，云粒子全部冻结。而冰雹云云粒子随温度降低增长缓慢，在 -36°C 时 r_e 最大 $36.3\mu\text{m}$ ，大约 36% 的个例达到了同质冻结温度 (-40°C) 云粒子才全部冻结，说明冰雹云 T_g 较深对流降水云更冷，要达到更高的高度云粒子才能冻结。同时，冰雹云上部呈现出明显的云粒子 r_e 随高度减小带，说明云顶存在砧状结构，反映出冰雹云中具有更强上升气流。

分析两类对流云的 T_{top} 、 T_g 、 r_{e-top} 和 r_{e-g} 的分布特征。从图 1b 看出，与深对流降水云比较，冰雹云的云顶 T_{top} 略暖（高度略低）、 T_g 较冷，平均值分别为 -60°C 和 -33°C ，对应的 r_{e-top} 和 r_{e-g} 均比较小，分别为 $29.4\mu\text{m}$ 和 $36.9\mu\text{m}$ ，最小的 r_{e-top} 和 r_{e-g} 分别为 $13.5\mu\text{m}$ 和 $24.8\mu\text{m}$ ，而深对流降水云 T_{top} 和 T_g 均值分别为 -66°C 和 -21.3°C ，对应的 r_{e-top} 和 r_{e-g} 平均值分别为 $39.8\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$ ，反映出两类云物理特征的明显差异。与深对流降水云相比，冰雹云云顶高度偏低，表明如果仅用卫星 TBB 作为冰雹云预警指标不够准确，很容易出现空报情况，可能将深对流降水云团预警为冰雹云团。

综上所述，在极轨卫星上，冰雹云呈现云微物理特征为：（1） T_g 较冷，均值为 -33°C ；（2）全部冰晶化时 r_{e-g} 未饱和 ($<40\mu\text{m}$)，均值 $36.9\mu\text{m}$ ，且 r_{e-g} 越小冰雹云越强；（3）云顶常出现云粒子 r_e 随高度减小带（云顶砧状结构）。这些共性特征也就是冰雹云早期识别指标。

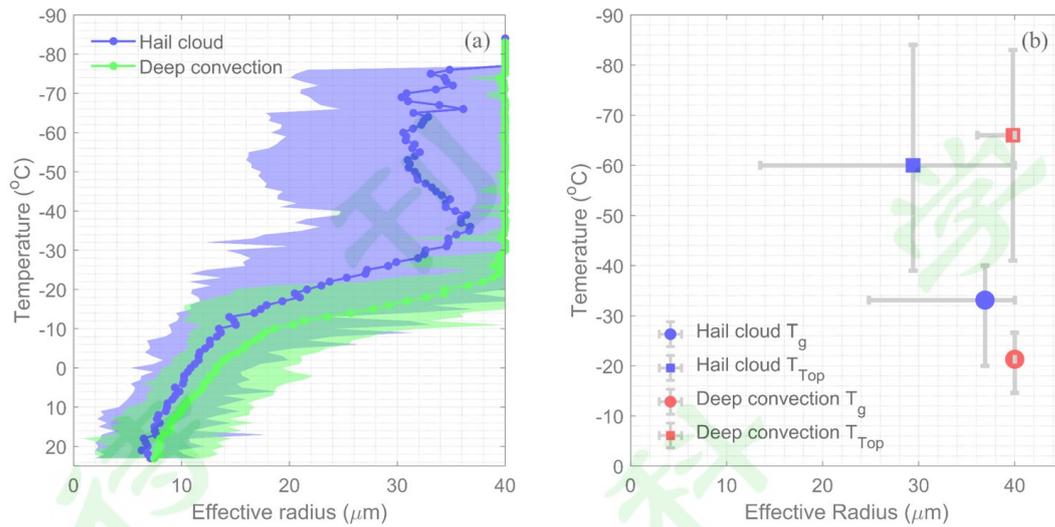


图 1 冰雹云和深对流降水云的 $T-r_e$ 分布特征 (a) 及两类云云顶温度(T_{top})和晶化温度 (T_g) 的均值和偏差分布 (b), (a) 中实线为同类型云所有个例在相同温度层 r_e 中值的平均值, 阴影为对应温度层 r_e 中值的范围, (b) 中圆点和方点分别表示同类型云所有个例 T_g 和 T_{top} 的平均值, 实线表示 T_g 和 T_{top} 的变化范围及对应 r_{e-g} 和 r_{e-top} 的变化范围

Fig. 1 The $T-r_e$ profiles of hail clouds and deep convective clouds (a) and average values and deviations of cloud top temperature (T_{top}) and glaciation temperature (T_g) of hail clouds and deep convective clouds (b), solid lines and shades in (a) represent the average of median r_e and its range at the same levels of temperature for the different clouds, dot and square in (b) represent the average values of T_g and T_{top} for the same type of cloud, respectively, and solid lines represent the variation range of T_g and T_{top} and the variation range of r_{e-g} and r_{e-top}

3.1.2 不同地区冰雹云微物理参量特征

为了了解不同地区的冰雹云特征, 进一步分析陕西、山东、贵州和新疆等各地冰雹云微物理定量特征。从图 2 可以看出: 对于 T_{top} 均值, 陕西和山东相当, 新疆略高, 贵州最低, 分别为 -59.9°C 、 -58.8°C 、 -55°C 和 -69.7°C , 贵州冰雹云的云顶较高, 对应各地的 r_{e-top} 均值分别为 $26.3\mu\text{m}$ 、 $33.9\mu\text{m}$ 、 $37\mu\text{m}$ 和 $35.6\mu\text{m}$; 对于 T_g 均值, 陕西最低 (接近同质冻结温度), 山东较暖, 新疆和贵州相近, 分别为 -36°C 、 -30.1°C 、 -28.3°C 和 -28°C , 对应的 r_{e-g} 均值分别为 $33.8\mu\text{m}$ 、 $39.6\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 和 $40\mu\text{m}$ 。

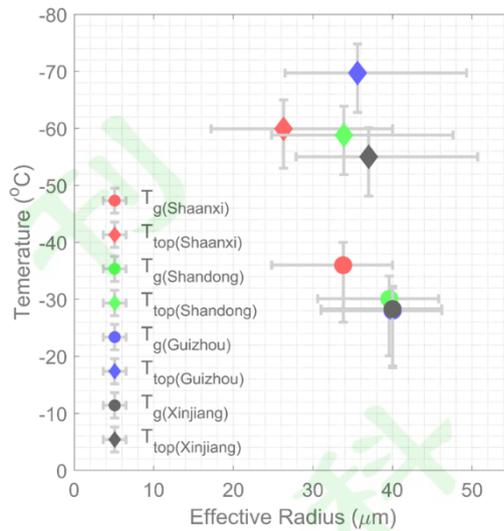


图2 陕西、山东、贵州和新疆冰雹云 T_{top} 和 T_g 均值和偏差分布，图中圆点和菱形点分别表示各地所有个例 T_g 和 T_{top} 的平均值，实线表示 T_g 和 T_{top} 的变化范围及对应 r_{e-g} 和 r_{e-top} 的变化范围

Fig. 2 Average values and deviations of T_{top} and T_g of hail clouds at Shaanxi, Shandong, Guizhou and Xinjiang, the circle and diamond represent the average values of T_g and T_{top} for all cases in each region, while the lines represent the variation range of T_g and T_{top} and the variation range of r_{e-g} and r_{e-top}

对各地冰雹云微物理定量分析结果表明，不同地区冰雹云微物理特征共性特点基本一致，即具备 T_g 较冷、 r_{e-g} 较小，以及云顶出现云粒子 r_e 随高度减小带等，但具体数值不同。造成这种差异的可能原因是不同地区的气象条件（如：可降水量、对流有效位能等）、背景气溶胶等影响云微物理特征参数存在差异。因此，应针对各地区分别建立不同数值的早期识别指标。

3.2 静止卫星探测冰雹云微物理特征及随时间演变

众所周知，一颗极轨卫星只有一次日间资料，对开展冰雹云监测预警而言，资料密度远远不够。我国发射的静止卫星 FY-4A，可以达到 5min 一次的中国区域全境扫描，非常利于冰雹云的监测预警。因此，将极轨卫星定量分析得到冰雹云早期识别指标，应用到 FY-4A 上，通过跟踪冰雹云微物理特征随时间演变，研究静止卫星冰雹云早期识别和自动预警。

针对发生在山东潍坊的一次冰雹过程，利用 FY-4A 资料分析冰雹云微物理特征演变。2019 年 8 月 16 日 15:25 山东潍坊市诸城发生冰雹强对流灾害天气。据记载，部分地区降雹厚度达 10cm，冰雹直径 30~50mm，受灾最严重的贾悦镇

降雹持续近 40 分钟。诸城地区 6 个镇受到不同程度冰雹袭击，导致农作物受灾面积 15.1 万亩，绝收面积 13.1 万亩，经济损失达 2.67 亿元，给农业生产造成了重大损失。

通过 2019 年 8 月 16 日 13:30~17:30（北京时）每半小时 FY-4A 资料反演冰雹云 $T-r_e$ 廓线，得到 r_e 、 T_g 和 T_{top} 等微物理参量，定量分析其演变过程，从 FY-4A 卫星上了解云团的增强或减弱。由于 8 月 16 日 15:16~15:44 对 FY-4A 实施了东西轨道控制，控制期间地面应用系统停止接收 FY-4A 云图，造成 15:30 的卫星数据缺失，故无 15:30 的 T 和 r_e 结果。

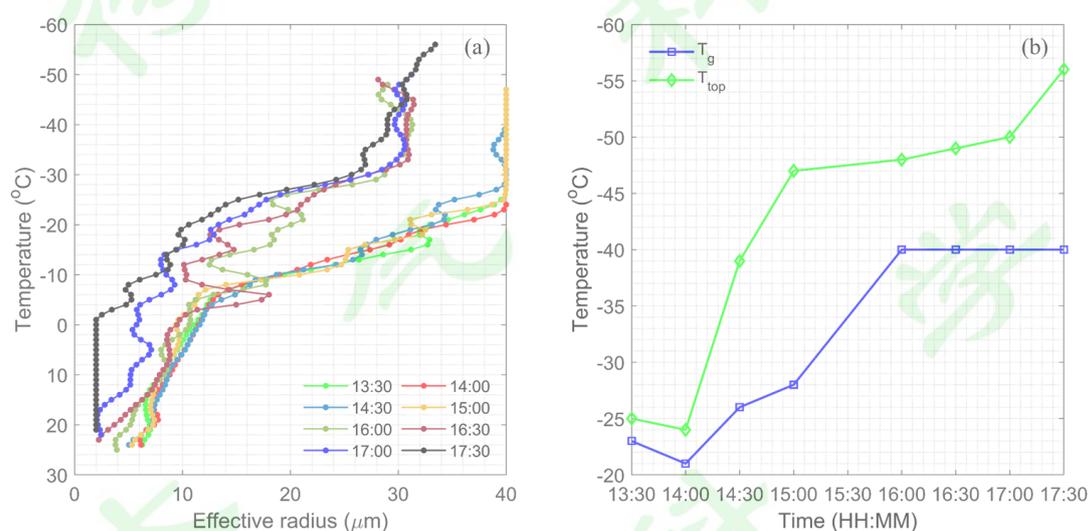


图 3 13:30~17:30 冰雹云 $T-r_e$ 分布 (a) 及 T_{top} 、 T_g 随时间的变化 (b)

Fig. 3 The temporal evolution of $T-r_e$ profiles (a) and T_{top} and T_g (b) of hail clouds from 13:30 to 17:30

图 3 给出了冰雹过程不同时次的 $T-r_e$ 分布特征和 T_{top} 、 T_g 随时间的变化。从图 3 看出，13:30~17:30 冰雹云 $T-r_e$ 廓线随时间线形变化较大，其中 13:30~15:00 r_e 随 T 降低增长较快， T_g 和 T_{top} 较暖，随时间变化 T_g 和 T_{top} 逐渐变冷，云系处于发展期，而 16:00~17:30 r_e 随 T 的降低增长较慢， T_g 均达同质冻结温度 -40°C ， T_{top} 冷，云顶增高，且云团上部 r_e 随 T 降低增长缓慢或减小，显示出云中较强的上升气流，云发展为旺盛期。

统计冰雹云 13:30~17:30 不同时次的云微物理参量，结果如表 1 所示，结合图 3 分析 $T-r_e$ 反映出的强对流特征，表现在：

(1) 云顶高 (T_{top} 冷)，降雹前 1 小时云顶呈现快速抬升过程。13:30 为 -25°C ，14:00~15:00 云顶呈现快速抬升过程， T_{top} 从 -24°C 下降到 -47°C ，15:25 左右地面

降雹。16:00~17:30 T_{top} 始终维持-48°C高度之上，并逐渐抬升， T_{top} 最低达-56°C，表明对流云团始终处于发展旺盛阶段。

T_g 较冷，降雹前 1 小时至降雹刚发生时， T_g 快速下降。14:00 T_g 为-22°C，至 15:00 T_g 下降到-28°C，16:00 进一步降到-40°C，之后一直维持-40°C。

(2) 云团上部 r_e 随顶高递减。13:30-14:30 r_{e-top} 较为稳定 (39.8~40 μm)，云顶向上发展 (-24~-39°C)。15:00~17:30 r_{e-top} 明显减小 (40~28.1 μm)，云顶逐步抬升，说明云团快速发展、对流旺盛。

r_{e-g} 随时间减小则对流加强，反之亦然。13:30~15:00 r_{e-g} 稳定在 40 μm ，16:00~17:30 r_{e-g} 随时间减小，对流增强。与 T_g 和 r_{e-top} 反映对流强弱结论一致。因此，利用 T_g 、 r_{e-g} 和 r_{e-top} 定量分析获得早期识别指标，应用到静止卫星，有望实现对冰雹云自动预警。

表 1 不同时次冰雹云的 T_{top} 、 T_g 、 r_{e-top} 和 r_{e-g} 值

Table 1 The T_{top} , T_g , r_{e-top} and r_{e-g} of hail clouds at different times of Beijing time (BJT)

时间 (北京时)	T_{top} (°C)	T_g (°C)	r_{e-top} (μm)	r_{e-g} (μm)
13:30	-25	-23	40	40
14:00	-24	-21	40	40
14:30	-39	-26	39.8	40
15:00	-47	-28	40	40
16:00	-48	-40	31	32.1
16:30	-49	-40	28.1	30.9
17:00	-50	-40	32.5	29.1
17:30	-56	-40	34.3	29.3

4 冰雹云卫星早期识别与自动预警

静止卫星跟踪冰雹云微物理特征演变分析表明，冰雹云在静止卫星上具有与极轨卫星相一致的云微物理特征响应，为冰雹云卫星早期识别和自动预警提供了新方法。虽然两种卫星搭载的传感器不同，分辨率也不一样，冰雹预警识别指标具体数值有所不同，例如，极轨卫星 $T_g < -30^\circ\text{C}$ ，静止卫星则是 $T_g < -20^\circ\text{C}$ 。但是，却具有相同的云微物理特征指标，即：晶化时 r_{e-g} 未饱和、云顶出现 r_e 递减带。将静止卫星冰雹云预警指标应用于 FY-4A 卫星上，跟踪云团发展演变，一旦满足指标，实现自动预警。卫星预警应用个例选用 2020 年 5 月 23 日、2019 年 8 月 16 日发生在山东及 2020 年 5 月 21 日、6 月 24 日发生在陕西的冰雹过程。通

通过对预警效果与地面降雹实况的对比，检验卫星预警方法的可靠性，探讨卫星在人工防雹中的应用潜力。

因5月23日发生的冰雹过程（简称5·23冰雹）具有突发性、局地性特点，故针对这个个例开展详细讨论。

表2 5·23冰雹地面降雹实况和卫星预警

Table 2 Early warning time for Hail clouds from FY-4A in comparison with actually happening time on May 23, 2020

序号	降雹开始时间 (北京时)	降雹地点	卫星预警初现时 间(北京时)	时间提前量 (min)	备注
1	12:00	烟台市	11:38	22	吻合
2	12:40	济南钢城区	12:19	21	吻合
3	12:40	淄博博山区	12:19	21	吻合
4	13:00	淄博沂源县	12:19	41	吻合
5	13:00	临沂平邑县	13:38	-38	漏报
6	14:00	烟台龙口市	11:38	142	吻合
7	14:40	烟台蓬莱市	11:38	182	吻合
8	15:00	临沂沂水县	13:38	82	吻合
9	17:00	烟台栖霞市	11:38	322	吻合

考虑到云团经历了生成、发展和合并等过程，故以实况降雹区上游气流的前向轨迹近似代表云团的移动路径，根据烟台、淄博和临沂三个主要降雹区域，给出三条气流前向轨迹，起点经纬度分别为(37°N, 117°E)、(36.5°N, 117°E)和(36°N, 116°E)，时间为北京时间11:00~17:00，选用离地8km高度轨迹线进行分析(图4)。

卫星预警与降雹实况对比分析时，分为三种情况评估卫星预警效果，即：实况降雹区在气流轨迹沿线范围内，且卫星提前于降雹时间给出了预警信号，则为预警与实况吻合；实况记录有降雹，卫星未提前给出预警信号，则为漏报；实况记录无降雹，卫星给出了预警信号，为空报。

基于FY-4A卫星资料反演得到08:00~18:00每5min间隔的云微物理合成图，图4给出了三条轨迹线上云团首次出现卫星预警信号时的云物理合成图和云团合并发展的合成图，结合表2地面降雹实况和卫星预警情况进行分析。

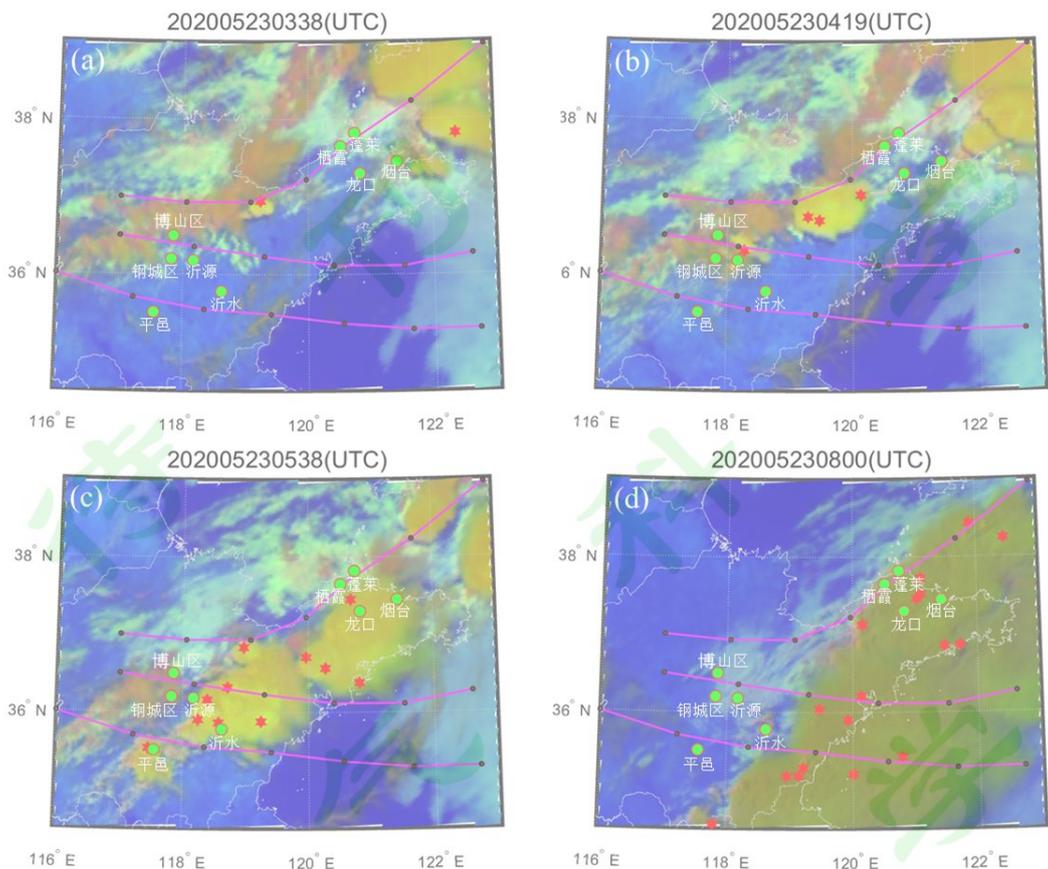


图 4 5-23 冰雹 11:38 (a)、12:19 (b)、13:38 (c) 和 16:00 (d) 卫星云微物理合成图, 绿色圆点为降雹地点, 红线为 11:00~17:00 8km 高度前向气流轨迹, 红色星号为卫星预警信号, 下同

Fig. 4 The day microphysical RGB at 11:38 (a), 12:19 (b), 13:38 (c) and 16:00 (d) on May 23, 2020. The purple lines represent the forward trajectory at height of 8km from 11:00 to 17:00, red hexagram represents the early warning by satellite and the green circle represents the hail events

首先对于烟台地区, 由图 4a 和 4d 可以看出, 烟台地区实况降雹区均处于云团移动路径上, 卫星最早出现预警信号的时间为 11:38, 随云团发展、移动, 实况降雹时云团覆盖降雹区域, 降雹地点分别为烟台、龙口、蓬莱和栖霞, 对应实况降雹时间分别为北京时间 12:00、14:00、14:40 和 17:00, 表明卫星预警与实况吻合。

其次分析淄博和济南钢城区, 由图 4b 可以看出, 实况降雹区处于云团移动路径上, 卫星预警信号最早出现在 12:19, 实况降雹开始时间分别为 12:40、12:40 和 13:00, 对应降雹地点分别为淄博博山区、济南钢城区和沂源县, 卫星预警与实况吻合。

最后对于临沂地区, 由图 4c 看出, 实况降雹区处于云团移动路径覆盖区域, 卫星预警信号最早出现在 13:38, 对照实况降雹开始时间发现, 平邑县和沂水县

实况降雹时间分别为 13:00 和 15:00，沂水县卫星预警与实况吻合，而平邑县实况降雹时间早于卫星预警时间，为漏报。

综观 5·23 冰雹整个降雹过程，三条气流轨迹线上的云团随时间发生、发展，并由西向东移动，在 13:30 左右云团开始合并壮大，最终移入东部海域。卫星预警与降雹实况比对分析表明，预警与实况有 8 次吻合，漏报 1 次。对于卫星预警与实况吻合的 8 次过程，卫星识别相对降雹实况的时间提前量平均可达 1.7 小时左右。

在对 5·23 冰雹讨论的基础上，进一步分析 2019 年 8 月 16 日发生在山东及 2020 年 5 月 21 日、6 月 24 日发生在陕西的冰雹过程卫星预警效果。3 次冰雹过程均引发多地降雹，详情见表 3。

表 3 山东、陕西冰雹个例地面降雹实况和卫星预警

Table 3 Early warning time for hail cloud from FY-4A in comparison with actually happening time for different dates at Shandong and Shaanxi

日期	降雹开始时间 (北京时)	降雹地点	卫星预警初现时 间(北京时)	时间提前量 (min)	备注
20190816	14:00	潍坊安丘市	14:45	-45	漏报
	15:25	潍坊诸城市	14:45	40	吻合
	15:30	临沂沂水县	14:45	45	吻合
	15:30	日照五莲县	14:45	45	吻合
	16:57	临沂莒南县	14:45	132	吻合
	17:00	日照莒县	14:45	135	吻合
20200521	14:01	延安延长县	13:45	16	吻合
	17:11	渭南白水县	14:30	161	吻合
	17:20	铜川耀州区	14:30	170	吻合
	17:21	铜川印台区	14:30	171	吻合
20200624	15:16	延安吴起县	13:23	113	吻合
	15:25	延安宝塔区	12:00	205	吻合
	16:36	延安延川县	12:00	276	吻合
	16:40	延安富县	13:23	197	吻合
	16:51	延安黄陵县	13:23	208	吻合

图 5 为 3 次冰雹过程冰雹云不同发展阶段云物理合成图，结合表 3 地面降雹实况和卫星预警情况进行分析。对于山东 2019 年 8 月 16 日冰雹过程（图 5a-c），卫星预警信号初现时间为北京时 14:45，实况降雹开始时间分别为北京时 14:00、15:25、15:30、15:30、16:57 和 17:00，对应降雹地点分别为安丘、诸城、沂水、五莲、莒南和莒县，预警与实况 5 次吻合、1 次漏报。分析陕西 2020 年 5 月 21

日冰雹过程（图 5d-f），延长县卫星预警信号初现时间为北京时 13:45，实况降雹开始时间 14:01，白水、耀州区和印台区卫星预警信号初现在 14:30，实况降雹开始时间分别为 17:11、17:20 和 17:21，预警与实况 4 次吻合。对于陕西 2020 年 6 月 24 日冰雹过程（图 5g-i），延安宝塔区和延川县预警信号初现时间为 12:00，实况降雹开始时间为 15:25 和 16:36，吴起、富县和黄陵卫星预警信号初现时间为 13:23，实况降雹开始时间分别为 15:16、16:40 和 16:51，预警与实况 5 次均吻合。

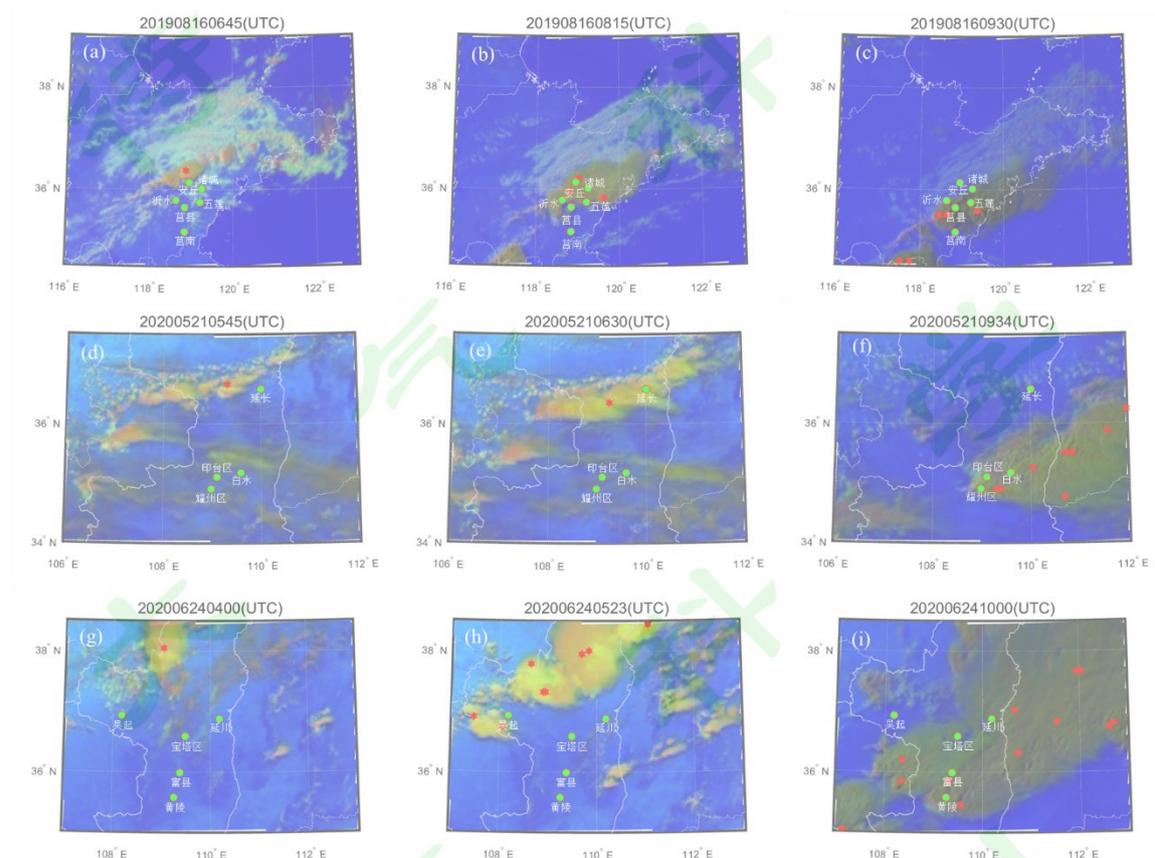


图 5 2019 年 8 月 16 日冰雹 12:45 (a)、16:15 (b)、17:30 (c) 和 2020 年 5 月 21 日 13:45 (d)、14:30 (e)、17:34 (f) 及 2020 年 6 月 24 日 12:00 (g)、13:23 (h)、18:00 (i) 卫星云微物理合成图

Fig. 5 The day microphysical RGB at 12:45 (a), 16:15 (b) and 17:30 (c) on August 16, 2019, 13:45 (d), 14:30 (e) and 17:34 (f) on May 21, 2020, 12:00 (g), 13:23 (h), and 18:00 (i) on June 24, 2020. The red hexagram represents the early warning by satellite and the green circle represents the hail events

通过对 4 次冰雹过程的分析表明，卫星自动预警与降雹实况共 22 次吻合，2 次漏报，卫星预警早于实况的时间平均可达 2 小时左右，为人工防雹早作业提供早识别基础。虽然 FY-4A 卫星能够较早地自动预警发生冰雹的强对流云团，但因对流云团覆盖的范围很大，卫星难以确定具体降雹位置，还需配合雷达监测确

定降雹位置和作业部位，开展人工防雹作业，以期提高作业的有效性。

5 结论

利用陕西、山东、贵州和新疆等地近十年日间冰雹天气过程记录和对应卫星观测数据，通过极轨卫星云微物理特征定量反演，对比分析了冰雹云和深对流降水云的微物理特征，比较了不同地区冰雹云微物理参量的差异，并通过 FY-4A 静止卫星反演分析了 2019 年 8 月 16 日山东地区一次冰雹过程云微物理特征的发展演变，探讨了冰雹云卫星识别预警的应用潜力，得到以下结论：

(1) 冰雹云与深对流降水云的云物理特征存在明显差异，卫星观测的冰雹云微物理特征表现在 3 个方面： T_g 较冷，均值为 -33°C ；全部冰晶化时 r_{e-g} 未饱和 ($<40\mu\text{m}$)，均值 $36.9\mu\text{m}$ ，且 r_{e-g} 越小冰雹云越强；云顶常出现云粒子 r_e 随高度的减小带（云顶砧状结构）。

(2) 分地区冰雹云微物理特征分析表明，各地冰雹云共性特点基本一致，即具备 T_g 较冷、 r_{e-g} 较小，以及云顶出现 r_e 随高度减小带等特点，但各地具体量化指标并不相同，实际应用时应针对各地进行相应调整。

(3) 利用 FY-4A 静止卫星跟踪冰雹云个例云物理特征的发展演变，结果表明：冰雹云在静止卫星上具有和极轨卫星相一致的特征，为冰雹灾害的卫星监测预警业务提供了一种方法。通过 FY-4A 静止卫星跟踪云团发展演变，当卫星出现自动预警信号时，结合雷达探测，确定冰雹发生的位置，做到提前预警。

(4) 通过对 4 次冰雹过程开展卫星自动预警与降雹实况对比分析得出：预警与实况共 22 次吻合，2 次漏报，卫星自动预警的时间提前量平均约 2 小时。

随着我国现代化建设稳步推进和保障人民生产、生活安全的需求进一步增强，对气象防灾减灾工作能力提出了更高的要求。与此同时，我国气象卫星综合探测能力不断提高，如何提高新一代卫星的定量应用水平、尽可能的发挥气象卫星在防灾减灾领域的作用，是当前气象卫星业务应用研究的热点之一。而在人工影响天气领域，人工防雹的关键是早识别、早作业。本文发挥我国新一代静止气象卫星 FY-4A 多通道、高频次、高空间分辨率和资料获取便利等优势，将冰雹云卫星早期识别指标应用于 FY-4A 静止卫星，实现冰雹云的自动预警，以期有效防御冰雹灾害争取早作业时间。应用中结合雷达临近观测，确定冰雹发生位置，提高防雹作业的有效性，具有广阔的业务应用价值。

参考文献 (References)

- Adler R F, Fenn D D. 1979. Thunderstorm intensity as determined from satellite data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18: 502-517.
- Adler R F, Mack R A. 1986. Thunderstorm cloud top dynamics as inferred from satellite observations and cloud top parcel model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 1945-1960.
- Amburn S A, Wolf P L. 1997. VIL density as a hail indicator [J]. *Wea. Forecasting*, 12: 473-478.
- David W. 1980. Observations of damaging hailstorms from geosynchronous satellite digital data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 108: 337-348.
- 范皓, 杨永胜, 段英, 等. 2019. 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析 [J]. *气象学报*, 77(5): 823-834. Fan Hao, Yang Yongsheng, Duan Ying, et al. 2019. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 77(5): 823-834. doi:10.11676/qxxb2019.063
- 付焱, 刘晓莉, 丁伟. 2016. 一次冰雹过程及雹云物理结构的数值模拟研究 [J]. *热带气象学报*, 32(4): 546-557. Fu Ye, Liu Xiaoli, Ding Wei. 2016. A numerical simulation study of a severe hail event and physical structure of hail cloud [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 32(4): 546-557. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.04.012
- 龚乃虎, 蔡启铭. 1982. 雹云的特征及其雷达识别 [J]. *高原气象*, 1(2): 43-52. Gong Naihu, Cai Qiming. 1982. The characteristics of hailstorms and their identification with radar [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 1(2): 43-52.
- 郭巍, 崔林丽, 顾闻, 等. 2018. 基于葵花 8 卫星的上海市夏季对流初生预报研究 [J]. *气象*, 44(9): 1229-1236. Guo Wei, Cui Linli, Gu Wen, et al. 2018. Summer convective initiation forecasting in Shanghai based on Himawari-8 satellite [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 44(9): 1229-1236. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.011
- 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 2001a. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I: 模式建立及冰雹的循环增长机制 [J]. *大气科学*, 25(5): 707-720. Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Hong Yanchao, et al. 2001a. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model. Part I: Model description and the mechanism of hail recirculation growth [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25(5): 707-720. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.05.13

-
- 郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 2001b. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 II: 冰雹粒子的分布特征 [J]. 大气科学, 25(6): 856-864. Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Hong Yanchao, et al. 2001b. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model. Part II: Characteristics of hail-category size distribution [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(6): 856-864. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.06.13
- 洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 26(3): 421-432. Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(3): 421-432.
- 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 2015. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征 [J]. 应用气象学报, 26(1): 57-65. Hu Sheng, Luo Cong, Zhang Yu, et al. 2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 26(1): 57-65. doi:10.11898/1001-7313.20150106
- 蒋瑛, 朱克云, 张杰. 2016. 贵州地区冰雹云微物理过程及发展机制数值模拟研究 [J]. 气象, 42(8): 920-933. Jiang Ying, Zhu Keyun, Zhang Jie. 2016. Microphysical process of hail cloud in Guizhou and numerical simulation research on its dynamic developing mechanism [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(8): 920-933. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.002
- 康凤琴, 张强, 渠永兴, 等. 2004. 青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究 [J]. 高原气象, 23(6): 736-742. Kang Fengqin, Zhang Qiang, Qu Yongxing, et al. 2004. Simulating study on hail microphysical process on the northeastern side of Qinghai-Xizang Plateau and its neighbourhood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23(6): 736-742.
- 蓝渝, 郑永光, 毛冬艳, 等. 2014. 华北区域冰雹天气分型及云系特征 [J]. 应用气象学报, 25(5): 538-549. Lan Yu, Zheng Yongguang, Mao Dongyan, et al. 2014. Classification and satellite nephogram features of hail weather in north China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 25(5): 538-549.
- 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林, 等. 2007. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析 [J]. 高原气象, 26(4): 812-820. Liao Yufang, Yu Xiaoding, Wu Linlin, et al. 2007. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(4): 812-820.
- Lindsey D T, Hillger D W, Grasso L, et al. 2006. Goes climatology and analysis of thunderstorms

-
- with enhanced 3.9-um reflectivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 2342-2353.
- 刘京华, 王彬, 韩雷, 等. 2012. 京津地区一次强对流天气的初生预警技术研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 48(1): 42-46. Liu Jinghua, Wang Bin, Han Lei, et al. 2012. Forecasting convective initiation for a convective weather event in Beijing-Tianjin region [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 48(1): 42-46. doi:10.13209/j.0479-8023.2012.007
- Nakajima T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part 1: Theory. *J. Atmos. Sci.*, 47: 1878-1893.
- 覃丹宇, 方宗义. 2014. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展 [J]. *气象*, 40(1): 7-17. Qin Danyu, Fang Zongyi. 2014. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40(1): 7-17. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.002
- Rosenfeld D, Lensky I M. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79(11): 2457-2476.
- Rosenfeld D, Woodley W L, Lerner A, et al. 2008. Satellite detection of severe convective storms by their retrieved vertical profiles of cloud particle effective radius and thermodynamic phase [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D04208. doi:10.1029/2007JD008600
- Setvak M, Rabin R M, Doswell III C A, et al. 2003. Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7, and 3.9um spectral bands [J]. *Atmos. Res.*, 66-67: 607-627.
- Skripniková K, Řezáčová D. 2013. Radar-based hail detection [J]. *Atmos. Res.*, 141: 31.
- 宋强, 王基鑫, 傅朝, 等. 2019. 甘肃一次冰雹过程降水及闪电活动特征 [J]. *干旱气象*, 37(3): 400-408. Song Qiang, Wang Jixin, Fu Zhao, et al. 2019. Characteristic of precipitation and lightning activity of a hailstorm event in Gansu province [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 37(3): 400-408. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-03-0400
- 汤兴芝, 黄兴友. 2009. 冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用 [J]. *暴雨灾害*, 28(3): 261-265. Tang Xingzhi, Huang Xingyou. 2009. Doppler radar identification parameters and their effect on early warning of hail clouds [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 28(3): 261-265.
- 王洪, 吴乃庚, 万齐林, 等. 2018. 一次华南超级单体风暴的 S 波段偏振雷达观测分析 [J]. *气*

-
- 象学报, 76(1): 92-103. Wang Hong, Wu Naigeng, Wan Qilin, et al. 2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 76(1): 92-103. doi:10.11676/qxxb2017.083
- 王俊, 俞小鼎, 邵庆国, 等. 2011. 一次强烈雹暴的三维结构和形成机制的单、双多普勒雷达分析 [J]. *大气科学*, 35(2): 247-258. Wang Jun, Yu Xiaoding, Tai Qingguo, et al. 2011. Analysis on the three-dimensional structure and formation mechanism of a severe hailstorm with single and dual-Doppler radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(2): 247-258.
- 王研峰, 黄武斌, 王聚杰, 等. 2019. 一次甘肃天水强冰雹的雷达回波特征及成因分析 [J]. *高原气象*, 38(2): 369-376. Wang Yanfeng, Huang Wubin, Wang Jujie, et al. 2019. Analysis on the characteristic of radar echo and the causes of a strong hail in Tianshui city of Gansu province [J]. *Plateau Meteorol* (in Chinese), 38(2): 369-376. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00077
- 王易, 徐芬, 吴海英. 2019. 一次致雹超级单体结构特征分析 [J]. *大气科学学报*, 42(4): 612-620. Wang Yi, Xu Fen, Wu Haiying. 2019. Structure characteristics analysis of a supercell hailstorm [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 42(4): 612-620. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171019013
- 吴剑坤, 俞小鼎. 2009. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述 [J]. *干旱气象*, 27(3): 197-206. Wu Jiankun, Yu Xiaoding. 2009. Review of detection and warning methods for sever hail events by Doppler weather radars [J]. *Journal of Arid Meteorology* (in Chinese), 27(3): 197-206.
- 夏文梅, 王晓君, 孙康远, 等. 2016. V型缺口在C波段多普勒雷达中的应用研究 [J]. *气象*, 42(1): 67-73. Xia Wenmei, Wang Xiaojun, Sun Kangyuan, et al. 2016. Application study of 'V' notch used in C band Doppler radar [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 42(1): 67-73. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.008
- 徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 2012. 一次强飚线云结构特征的卫星反演分析 [J]. *高原气象*, 31(1): 258-268. Xu Xiaohong, Yu Xing, Zhu Yannian, et al. 2012. Analysis on satellite retrieval of cloud structure in a severe squall line process [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 31(1): 258-268.
- 徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 2018. 6·23 龙卷 FY-2G 卫星云微物理特征分析 [J]. *高原气象*,

-
- 37(6): 1737-1748. Xu Xiaohong, Yu Xing, Zhu Yannian, et al. 2018. Cloud microphysical properties of a tornado revealed by FY-2G geostationary satellite [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(6): 1737-1748. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00041
- 薛晓颖, 任国玉, 孙秀宝, 等. 2019. 中国中小尺度强对流天气气候学特征 [J]. 气候与环境研究, 24(2): 199-213. Xue Xiaoying, Ren Guoyu, Sun Xiubao, et al. 2019. Climatological characteristics of meso-scale and micro-scale strong convective weather events in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(2): 199-213. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17148
- 杨慧玲, 肖辉, 洪延超. 2011. 气溶胶对冰雹云物理特性影响的数值模拟研究 [J]. 高原气象, 30(2): 445-460. Yang Huiling, Xiao Hui, Hong Yanchao. 2011. Numerical simulation of aerosol impact on cloud physics of hailstrom [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(2): 445-460.
- 杨淑华, 赵桂香, 程海霞, 等. 2019. 脉冲风暴造成的山西北部三次冰雹天气对比分析 [J]. 干旱气象, 37(1): 69-77. Yang Shuhua, Zhao Guixiang, Cheng Haixia, et al. 2019. Comparative analysis of three hail weather processes caused by pulse storms in northern Shanxi province [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 37(1): 69-77. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-01-0067
- 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩, 等. 2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警 [J]. 高原气象, 24(3): 456-464. Yu Xiaoding, Wang Yingchun, Chen Mingxuan, et al. 2005. Severe convective weather warnings and its improvement with the introduction of the NEXRAD [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(3): 456-464.
- 俞小鼎, 郑永光. 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展 [J]. 气象学报, 78(3): 391-418. Yu Xiaoding, Zheng Yongguang. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(3): 391-418. doi:10.11676/qxxb2020.035
- 张鸿发, 左洪超, 郟秀书, 等. 2002. 平凉冰雹云回波特征分析 [J]. 气象学报, 60(1): 110-115. Zhang Hongfa, Zuo Hongchao, Qie Xiushu, et al. 2002. Analysis of echo characteristics of Pingliang hailstorm [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60(1): 110-115.
- 张杰, 张强, 康凤琴, 等. 2004a. 西北地区东部冰雹云的卫星光谱特征和遥感监测模型 [J]. 高原气象, 23(6): 743-748. Zhang Jie, Zhang Qiang, Kang Fengqin, et al. 2004a. Satellite

-
- spectrum character of hail cloud and pattern of remote sensing monitor in east of northwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23(6): 743-748.
- 张杰, 李文莉, 康凤琴, 等. 2004b. 一次冰雹云演变过程的卫星遥感监测与分析 [J]. *高原气象*, 23(6): 758-763. Zhang Jie, Li Wenli, Kang Fengqin, et al. 2004b. Analysis and satellite monitor of a developing process of hail cloud [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23(6): 758-763.
- 张磊, 张继东, 热苏力·阿不拉. 2014. 南疆阿克苏冰雹天气的判识指标研究 [J]. *干旱气象*, 32(4): 629-635. Zhang Lei, Zhang Jidong, Rasul Abl. 2014. Analysis on identifying indexes of hail weather process in Akesu of the southern Xinjiang [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 32(4): 629-635. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0629
- 张文海, 李磊. 2019. 人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用 [J]. *气象学报*, 77(2): 282-291. Zhang Wenhai, Li Lei. 2019. A preliminary application of artificial intelligence on the detection and nowcasting of hail weather [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 77(2): 282-291. doi:10.11676/qxxb2019.014
- 张小娟, 陶玥, 刘国强, 等. 2019. 一次冰雹云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 Xiaojuan, Gao Yue, Liu Guoqiang, et al. 2019. Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 45(3): 415-425.
- Zhang Y, Fang C. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with doppler weather radar data [J]. *Acta. Meteorologica Sinica.*, 62(3): 317-328.
- 赵文慧, 姚展予, 贾烁, 等. 2019. 1961~2015年中国地区冰雹持续时间的时空分布特征及影响因子研究 [J]. *大气科学*, 43(3): 539-551. Zhao Wenhui, Yao Zhanyu, Jia Shuo, et al. 2019. Characteristics of spatial and temporal distribution of hail duration in China during 1961-2015 and its possible influence factors [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(3): 539-551. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18123
- 周鑫, 周顺武, 覃丹宇, 等. 2019. 利用 FY-2F 快速扫描资料分析对流初生阶段的云顶物理量特征 [J]. *气象*, 45(2): 216-227. Zhou Xin, Zhou Shunwu, Qin Danyu, et al. 2019. Analysis of cloud top features during convective initiation using FY-2F satellite scan data [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 45(2): 216-227. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.007

朱敏华, 俞小鼎, 夏峰, 等. 2006. 强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析 [J]. 应用气象学报, 17(2): 215-223. Zhu Minhua, Yu Xiaoding, Xia Feng, et al. 2006. Analysis on strong hail storm three-body scattering signature using Doppler weather radar data [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17(2): 215-223.