

王智敏,李斌,冯婉悦,等,2024. 基于 NPP/VIIRS 数据的新疆夏季强对流云微物理特征及其区域差异[J]. 气象,50(10):1175-1186. Wang Z M, Li B, Feng W Y, et al, 2024. Microphysical characteristics and regional differences of summer severe convective cloud in Xinjiang based on NPP/VIIRS data[J]. Meteor Mon, 50(10):1175-1186(in Chinese).

基于 NPP/VIIRS 数据的新疆夏季强对流云 微物理特征及其区域差异*

王智敏^{1,2,3} 李斌^{1,3} 冯婉悦⁴ 刘贵华⁵ 李圆圆^{1,3} 岳治国⁶

1 新疆人工影响天气办公室, 乌鲁木齐 830002

2 中国气象局高影响天气重点开放实验室, 长沙 410000

3 新疆人工影响天气工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830002

4 新疆气象技术装备保障中心, 乌鲁木齐 830002

5 陕西省气象科学研究所, 西安 710016

6 陕西省人工影响天气办公室, 西安 710016

提 要: 冰雹灾害是新疆地区主要灾害性天气之一, 具有地域性强、次数多、灾情重等特点, 开展新疆不同地区冰雹云微物理特征研究具有重要意义。利用 2015—2021 年新疆地区强对流天气过程及对应 NPP/VIIRS 卫星资料, 采用卫星云微物理反演技术, 定量分析了冰雹云和深对流云微物理特征, 对比研究了南北疆冰雹云微物理参量差异。结果表明: 冰雹云晶化温度 (-34.0°C) 较深对流云 (-30.5°C) 更低, 深对流云顶高度更高, 冰雹云顶存在砧状结构。北疆地区冰雹多发在 6—7 月, 南疆集中在 5—7 月发生, 降雹时刻主要分布在 15:00—20:00, 南疆冰雹出现在凌晨和上午的占比较北疆多; 北疆和南疆降雹持续时间均值集中在 12.60 min 和 12.27 min, 冰雹最大直径均值分别为 13.53 mm 和 12.80 mm, 北疆冰雹云顶更高、降雹持续时间较长, 冰雹直径更大, 冻结温度比南疆更低。北疆和南疆冰雹云底温度和云底高度均值分别为 5.15°C 、 1.96 km 和 4.85°C 、 2.19 km , 北疆云底温度比南疆暖, 云底高度比南疆低; 云底平均上升速度南疆 ($2.07\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 是北疆 ($1.84\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的 1.13 倍, 北疆冰雹云平均厚度 (8.90 km) 比南疆 (8.79 km) 大 1.25%; 受人类活动和工业污染等因素影响, 北疆冰雹云底云凝结核数浓度均值 ($396\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$) 比以农业为主的南疆地区 ($240\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$) 多 65%, 冰雹云底最大过饱和度均值分别为 0.55% 和 0.85%。受强上升气流影响, 云粒子增长时间短, 各个增长带发展缓慢, 无雨胚形成带。有针对性地提前在云中低层播撒吸湿性核, 促使云底尽早形成暖云降水或提高冰晶繁生能力, 在低于 -5°C 层附近过量播撒 AgI 冰核, 争食云中过冷水, 可达到增雨防雹的目的。

关键词: 新疆地区, 强对流云, NPP 卫星, 云微物理特征, 区域差异

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.040801

Microphysical Characteristics and Regional Differences of Summer Severe Convective Cloud in Xinjiang Based on NPP/VIIRS Data

WANG Zhimin^{1,2,3} LI Bin^{1,3} FENG Wanyue⁴ LIU Guihua⁵ LI Yuanyuan^{1,3} YUE Zhiguo⁶

1 Xinjiang Weather Modification Office, Urumqi 830002

2 Oper Project of the High Impact Weather Key Laboratory of CMA, Changsha 410000

3 Xinjiang Weather Modification Engineering Technology Research Center, Urumqi 830002

4 Xinjiang Meteorological and Technical Equipment Support Center, Urumqi 830002

5 Shaanxi Province Institute of Meteorological Research, Xi'an 710016

6 Shaanxi Provincial Office of Weather Modification, Xi'an 710016

* 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2021D01A153、2022D01B182)、中国气象局高影响天气重点开放实验室开放课题、新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202412)和新疆气象局引导性计划项目(YD202201、YD202203)共同资助

2023 年 6 月 18 日收稿; 2024 年 1 月 18 日收修定稿

第一作者: 王智敏, 主要从事雷达技术、大气探测研究. E-mail: 569830205@qq.com

通讯作者: 李斌, 主要从事大气遥感、人工影响天气研究. E-mail: 2446824065@qq.com

Abstract: Hail disaster is one of the main disastrous weather events in Xinjiang, with strong regional characteristics, multiple occurrences, and severe disasters. It is of great significance to conduct research on the microphysical characteristics of hail clouds in different regions of Xinjiang. This article uses severe convective weather processes in Xinjiang from 2015 to 2021 and corresponding NPP/VIIRS satellite data as well as satellite cloud microphysical inversion technology and quantitatively analyzes the microphysical characteristics of hail clouds and deep convective clouds. A comparative study is conducted on the differences in microphysical parameters of hail clouds in northern and southern Xinjiang. The results show that the crystallization temperature of hail cloud (-34.0°C) is lower than that of deep convective cloud (-30.5°C), the height of deep convective cloud top is higher, and the hail cloud top has anvil structure. Hail mostly occurs in June–July in northern Xinjiang, and in May–July in southern Xinjiang. Hail time is mainly distributed from 15:00 BT to 20:00 BT. Hail in southern Xinjiang occurs in the wee hours and morning, with higher frequency than in northern Xinjiang. The mean durations of hail in northern and southern Xinjiang are 12.60 min and 12.27 min, and the mean maximum diameters of hail are 13.53 mm and 12.80 mm, respectively. The hail cloud top in northern Xinjiang is higher, the duration of hail is longer, the diameter of hail is larger, and the freezing temperature is lower than that in southern Xinjiang. The mean cloud bottom temperature and cloud bottom height of hail in northern and southern Xinjiang are 5.15°C , 1.96 km and 4.85°C , 2.19 km, respectively. The cloud bottom temperature in northern Xinjiang is warmer than that in southern Xinjiang, and the cloud bottom height is lower than that in southern Xinjiang. The mean rising speed of cloud base in southern Xinjiang ($2.07\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) is 1.13 times that in northern Xinjiang ($1.84\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), and the average thickness of hail cloud in northern Xinjiang (8.90 km) is 1.25% greater than that in southern Xinjiang (8.79 km). Influenced by human activities, industrial pollution and other factors, the mean concentration of condensation nuclei at the bottom of hail cloud in northern Xinjiang (396 cm^{-3}) is 65% higher than that in southern Xinjiang (240 cm^{-3}) where agriculture is dominant. The mean maximum supersaturations of hail cloud bottom are 0.55% and 0.85%, respectively. Affected by the strong updraft, the growth time of hail cloud particles is short, each growth zone develops slowly, and there is no rain embryo formation zone. Targeted seeding of hygroscopic nuclei in the middle and lower layers of the cloud in advance can promote the formation of precipitation at the bottom of the cloud as soon as possible, and excessive seeding of AgI ice nuclei near the 0°C layer will compete for the supercooled water in the cloud, which can achieve the goal of increasing rain and preventing hail.

Key words: Xinjiang, severe convective cloud, NPP satellite, cloud microphysical characteristic, regional difference

引 言

冰雹是一种极端灾害性天气事件,它是在强对流天气条件下,在特定地理地形环境区域内触发的局地性天气系统。新疆是我国西北地区冰雹灾害多发地区之一,夏季冰雹出现频繁,对当地的农牧业、经济作物和人民生命财产安全构成极大威胁。通过探测认识新疆地区强对流云的微物理特征,对提前识别干旱半干旱地区对流云的催化潜力,有针对性开展人影作业具有十分重要的意义(王飞等,2022;

夏凡等,2023;王秀明等,2023)。目前用于监测对流天气的主要工具为天气雷达和气象卫星。地基天气雷达受地形条件及观测组网等因素影响,一些对流天气过程不在雷达有效探测范围内,存在较大的探测盲区。而卫星资料因其覆盖范围广、时空分辨率高,能够提供多通道、多时段大范围的云降水信息,因此在对流云降水研究中发挥着愈来愈重要的作用。地基天气雷达主要探测云中降水粒子的特征演变,气象卫星重点对云系中的云滴变化特征进行监测,而降水粒子都是由云滴粒子发展演变得到的结果,其形成要先于降水粒子。因此,基于卫星资料提

前判别对流云人工催化潜力等具有较好的应用前景(孙继松,2023;尉英华等,2023)。国内外学者利用卫星资料开展了大量强对流云结构特征方面的研究,如张杰等(2004)基于 NOAA 卫星的 AVHRR 观测资料,统计分析了西北地区东部冰雹云的光谱特征,得出雹云的热红外亮温在 245 K 以下。蓝渝等(2014)利用静止气象卫星资料,研究表明华北地区绝大多数的冰雹过程发生在对流云团的快速发展阶段。宋强等(2019)利用热带测雨卫星(TRMM)的测雨雷达(PR)和闪电成像仪(LIS)资料分析了甘肃一次强冰雹天气中降水结构和闪电活动特征。Qie et al(2022)利用 TRMM 卫星 17 年的降水雷达和闪电观测数据,研究发现青藏高原不同地区雷暴云在季节变化、对流强度和结构等方面存在显著差异。Wu et al(2022)结合 16 年的 TRMM 卫星观测结果,研究了南亚季风前和季风期间喜马拉雅南麓地区极端对流系统的强度变化特征。白洁等(1997)利用 GMS 卫星的红外云图信息,采用图像学分析方法,实现了强对流云团的识别和追踪。郑永光等(2008)利用 10 年的静止卫星红外亮温资料对中国及附近地区夏季中尺度对流系统(MCS)进行了统计分析,发现研究区域内 MCS 存在单峰与多峰型的日变化特点,其中单峰型主要在高原与山区,多峰型集中于平原与盆地。

随着卫星探测技术的不断发展,基于多光谱的云微物理反演方法已经广泛应用于云降水物理等方面研究。其中 Rosenfeld and Lensky(1998)提出了利用卫星反演的云微物理参数分析云垂直结构和云降水过程的方法,并用同步飞机探测资料进行了验证。Rosenfeld et al(2008)利用云顶温度(T)-粒子有效半径(r_e)的云剖面分析方法,研究了强对流云中的微物理发展过程,发现强的上升气流促进了冰雹云的形成发展。戴进等(2011)利用 NOAA 卫星反演分析了青藏高原雷暴云降水的微物理特征,发现冰相增长阶段为主要的降水粒子增长过程。徐小红等(2012;2022)基于陕西、山东和贵州等地近 10 年降雹记录和 MODIS 卫星观测数据,通过卫星云微物理特征定量反演,比较了不同地区冰雹云微物理参数的差异,探讨了冰雹云卫星识别预警应用潜力。岳治国等(2018)利用 NPP(National Polar orbiting Partnership)卫星资料反演了青藏高原对流云微物理特征,指出 NPP/VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)卫星资料空间分辨率高,在反

演对流云微物理特征方面有独特的优势。NPP/VIIRS 的红外通道空间分辨率比 MODIS 等传感器相比提高了 3 倍,在精确反演云微物理参量方面具有巨大优势(Hillger et al, 2013; Rosenfeld et al, 2014b)。Zhu et al(2014)和 Zheng et al(2015)利用 NPP/VIIRS 高分辨率资料反演得出了对流云的云底温度、云底高度和云底上升速度,反演的云底温度与美国南部地区的激光云高仪和探空资料进行对比,发现标准差仅为 1.1°C ,基于地面激光雷达检验反演的云底上升速度,得出其标准差为 $0.41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Rosenfeld et al(2014a)建立了反演对流云底最大过饱和度及云凝结核浓度(N_{ccn})的方法,通过地基 CCN 计数器对反演的 N_{ccn} 的匹配验证,发现其误差为 20%(Rosenfeld et al, 2016)。基于高分辨率卫星资料开展强对流云微物理特征的相关研究,对提高对流云形成发展机制的物理学认知,提升人工增雨防雹作业科技水平具有重要意义。通过建立基于云微物理特征为分级判断依据的人工影响天气作业概念模型,对科学指挥人影作业十分重要(张强等,2009)。

新疆位于我国中高纬度地区,境内高山环绕、地形地貌复杂、绿洲与荒漠共存且相互作用,形成了独特的冰川-绿洲-荒漠生态气候系统格局(热苏力·阿不拉等,2015)。新疆夏季降水中对流性降水占总降水比例为 50%~70%(蒋慧敏等,2019)。冰雹是新疆夏季发生的频率较高并且最严重的自然灾害之一(刘德祥等,2004;李照荣等,2005),人们一直在寻找有效的人工防雹技术,而防雹的前提需要对当地冰雹云的微物理演变过程有一个全面的理解。冰雹形成和增长过程中的微物理过程决定了冰雹云的发展和消亡(康凤琴等,2004)。由于新疆地域广阔,地形地貌复杂(包括山脉、戈壁、沙漠等)、地面观测站点稀少,南北疆气候差异巨大,因而极大地制约了对冰雹过程的研究,所以针对新疆天山南北不同地区强对流云降水的微物理特征研究很有必要。本研究利用陕西省气象科学研究所和以色列希伯来大学 Rosenfeld et al(2014b)共同开发的 NPP/VIIRS 卫星格点对流云云物理自动反演系统,对新疆对流云降水多种云微物理参数进行反演,对比分析天山南北麓不同地区冰雹云和深对流云的微物理特征,以为建立新疆不同地区对流云人工催化作业可播性指标,持续提升新疆人影作业的科学性和有效性提供科技支撑。

1 数据和方法

1.1 资料来源

NPP 卫星是由美国航空航天局(NASA)和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)共同设计研发,2011年10月28日成功发射,主要用于监测全球环境和获取大气环境数据(Miller et al,2006),对观测资料进行了严格的内外部定标和交叉验证,均一性好,可靠性高。NPP为极轨卫星,运行以16d为一个周期,搭载的VIIRS观测仪器具有22个对地观测通道,卫星红外通道分辨率达375m,与MODIS相比,VIIRS具有空间分辨率高、观测精度高、观测范围宽等优势,为研究云降水提供了精细的数据,特别是在精确反演冰雹等对流云微物理结构方面显示出独特的优势(Yue et al,2019;范思睿等,2021)。

本研究收集了2015—2021年6—8月南北疆的冰雹云和深对流云个例,将这两类对流云发生发展时间与NPP卫星过境时间进行匹配,筛选出了主要分布在北疆地区伊犁河谷、塔额盆地和南疆阿克苏地区、喀什地区的27个冰雹云个例和26个深对流云个例(图1)。选取个例须满足以下条件:为保证反演精度,关注区域的卫星天顶角介于 $-20^{\circ}\sim 50^{\circ}$; $T-r_e$ 变化曲线应含有低层云参量信息,卫星过境时间在降雹前2小时以内。文中利用NPP/VIIRS L1B(空间分辨率为375m)数据结合美国环境预报中心(NCEP)6h间隔 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ FNL资料的温度、气压和位势高度廓线数据等,反演了 T_{cb} (云底温度)、 T_g (晶化温度)、 T_{top} (云顶温度)、 H_{cb} (云底高度)、 W_{cb} (云底上升速度)、 N_{cen} (云凝结核浓度)、 D_{cid} (云层厚度)、 r_{e-top} (云顶粒子有效半径)和 r_{e-g} (晶化粒子有效半径)等云微观物理参量,进行统计分析。

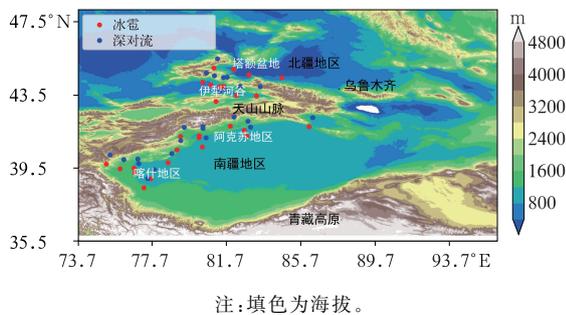


图1 冰雹和深对流天气过程的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of hail and deep convection weather processes

1.2 卫星反演云微物理分析方法

1.2.1 多光谱合成方法

利用NPP/VIIRS卫星可见光和红外通道多光谱卫星资料,通过组合编码,反演生成了RGB合成图,用红、绿、蓝三种颜色组合来反映云物理特征,达到可视化显示云特征的效果。在反演分析时,可以根据不同颜色来大致判断云的类型,较高冰晶化的云体为红色,有效半径较小的云体呈黄色,当温度低于 0°C 时为过冷水云,云较厚时为亮黄色(刘贵华等,2012)。

1.2.2 云垂直结构分析方法

NPP/VIIRS卫星探测只能获取云顶的信息,为了解云内部微观特性演变信息,需要利用各态历经假定进行时空转换。各态历经假定条件如下:研究区域内不同云顶附近的 T 和 r_e 与同一高度上云内的 T 和 r_e 相似,认为这是研究区域内每一块云随时间发展的过程,即将空间分布的信息看成是时间变化的信息。这一假定,已通过飞机穿云观测进行了验证(Rosenfeld et al,2008;2014b)。通过选取关注区域内不同高度的云就可以得出 $T-r_e$ 变化曲线。为了与 $T-r_e$ 特征相对应,将云中微物理过程简化为5个主要过程(Rosenfeld and Lensky,1998),见图2。

2 结果分析

2.1 冰雹云与深对流云微物理特征分析

通过对比分析冰雹云和深对流云的 $T-r_e$ 变化特征,如图3所示,发现新疆这两类对流云的 $T-r_e$

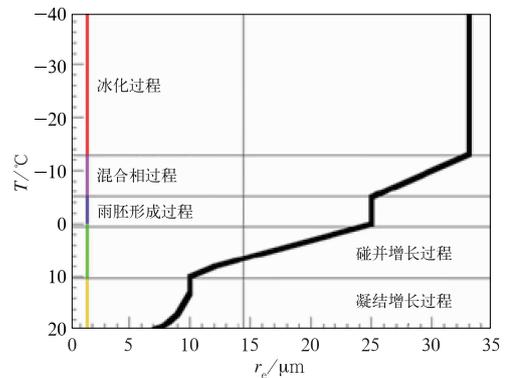
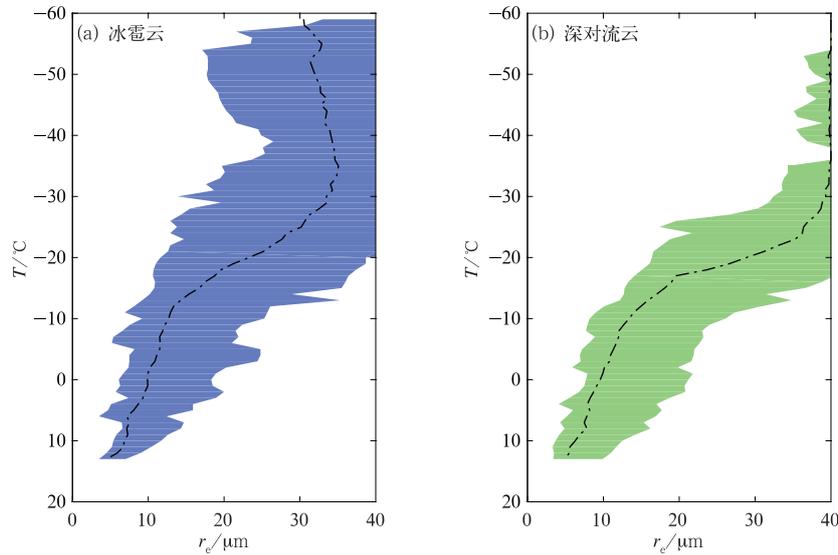


图2 $T-r_e$ 图5个云微物理过程分布

Fig. 2 Five cloud microphysical processes in $T-r_e$ diagram



注:虚线为 r_e 中值的均值,阴影为 r_e 中值的范围。

图 3 新疆两类强对流云的 $T-r_e$ 分布

Fig. 3 $T-r_e$ distribution of two types of severe convective clouds in Xinjiang

廓线有明显区别。深对流云中的粒子大小随温度降低增长较快,晶化温度(T_g)在大约 -30.5°C 时云粒子全部冻结。 T_g 是指云中所有液滴完全冰晶化的温度,同质冻结温度为 -40°C 。冰雹云中的粒子半径随高度升高增大相对较慢, r_e 达到最大值 $35.2\ \mu\text{m}$ 时 T_g 为 -34.0°C ,其中大约有 28.6% 的个例达到了 -40°C ,说明冰雹云 T_g 较深对流云更低,冰雹云粒子要达到比深对流云粒子更高的位置,才会完全冰晶化,表明冰雹云较深对流云有更强的上升气流。由于冰雹云内部较强的上升气流,云滴来不及充分生长便被带到更高的高度同质冻结,致使冰雹云顶冰晶很小,反射率较高,云顶出现砧状云, $T-r_e$ 曲线存在随高度升高云粒子逐渐变小的现象(Setvák et al,2003;Rosenfeld et al,2008)。

从图 4 可以看出,新疆深对流云和冰雹云的 T_{top} 、 T_g 和对应的 r_e 变化特征存在差异。深对流云和冰雹云的 T_{top} 平均值分别为 -52.0°C 和 -50.5°C ,分布范围分别在 $-60\sim-44^{\circ}\text{C}$ 和 $-58.67\sim-39.67^{\circ}\text{C}$,深对流云 T_{top} 均值较冰雹云低 1.5°C ,冰雹云顶高度较低;深对流云和冰雹云的 T_g 均值分别是 -22.75°C 和 -29.35°C ,分布范围分别主要位于 $-28\sim-15^{\circ}\text{C}$ 和 $-38\sim-21^{\circ}\text{C}$,冰雹云 T_g 均值比深对流云低 29% 。对应两类对流云的 $r_{e-\text{top}}$ 平均值分别是 $40\ \mu\text{m}$ 和 $31.67\ \mu\text{m}$,深对流云的 $r_{e-\text{top}}$ 集中在 $37.1\sim40.0\ \mu\text{m}$,冰雹云的 $r_{e-\text{top}}$ 在 $17.9\sim40.0\ \mu\text{m}$,

可见冰雹云顶部的云粒子较小(这也证明了上述的冰雹云上升气流特征)。深对流云和冰雹云的 r_{e-g} 均值分别为 $40.00\ \mu\text{m}$ 和 $33.58\ \mu\text{m}$,前者 r_{e-g} 分布在 $39.0\sim40.0\ \mu\text{m}$;后者 r_{e-g} 集中在 $19.6\sim40.0\ \mu\text{m}$,当达到冰化温度时,冰雹云粒子 r_{e-g} 未饱和。文中统计结果与徐小红等(2022)得出的陕西、山东和贵州地区冰雹云 T_{top} 均值(-59.9 、 -58.8 和 -69.7°C)进行对比分析,得出新疆冰雹云的 T_{top} 较其他地区高 $8.3\sim19.2^{\circ}\text{C}$ 。干旱半干旱地区由于下垫面相对干燥,云底温度偏低,入云水汽少,对流云发展强度较弱。这与王昀(2021)统计发现新疆干燥的地表、较

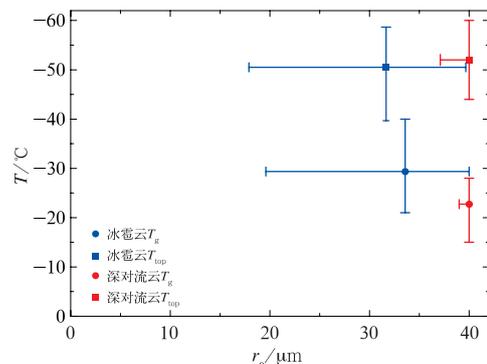


图 4 新疆两类强对流云的 T_{top} 和 T_g 均值和偏差分布

Fig. 4 T_{top} and T_g mean and deviation distribution of two types of severe convective clouds in Xinjiang

高的温度露点差造成对流有效位能(CAPE)值比中国东部地区偏低的结果一致。

2.2 南北疆冰雹云微观参量特征

新疆地处中高纬度地区,地域辽阔,南北距离达 23 个纬度,东西跨越 14 个经度。以天山为界分为南疆和北疆,由于天山山脉对西风气流携带水汽的分割和拦截,大部分水汽进入北疆地区,而能到达南疆的水汽较少,特殊的地理位置和地形条件,导致南北疆气候特征存在明显的地域差异,北疆为温带大陆性干旱半干旱气候,南疆属于暖温带大陆性干旱气候。南疆的年均气温、蒸发量高于北疆,北疆的年均降水量多于南疆(范丽红,2006)。新疆的冰雹天气过程主要发生在山区,北疆多发于西天山北麓如伊犁河谷、博州谷地和塔额盆地等地区,北疆的喇叭口地形等特殊的地貌结构造成的地形强迫和地面感热作用,有利于气团快速抬升形成冰雹(刘德祥等,2004)。南疆冰雹灾害集中在天山南脉的背风坡,主要分布在阿克苏、喀什及附近地区。由于背依天山,东邻塔克拉玛干沙漠,独特的地形地貌使这一区域成为冰雹的高发区。这主要是因为林地、草地和不同作物的耕地与荒漠的交接处的土壤地表温度不一,增大了下层大气的不稳定能量,促进了对流的发展。强对流过程主要分布在山脉的边坡和林地、草地和耕地交错地区(渠永兴,2004)。因此,本文通过分析北疆和南疆不同地区冰雹云的微观参量特征,以加深对天山南北不同地形地貌条件下冰雹云演变过程的物理学认知。

本文对 2015—2021 年全疆 229 场冰雹天气进行了分析,其中南疆地区选取了 138 个个例,北疆地

区则为 91 个个例。针对南北疆地区出现冰雹最早、最晚日期进行了统计,发现在南疆地区,冰雹最早出现在 2021 年 3 月 31 日(阿克苏地区库车市),最晚日期为 2019 年 10 月 13 日(阿克苏地区沙雅县);北疆地区,冰雹最早出现时间是 2019 年 4 月 28 日(石河子市),最晚日期是 2018 年 9 月 24 日(伊犁州昭苏县),分析表明在南疆地区冰雹出现最早时间比北疆地区早一个月左右的时间,冰雹最终结束日期比北疆晚近一个月。如图 5a 所示,北疆地区冰雹多发在 6—7 月,南疆地区冰雹过程集中在 5—7 月发生。南北疆冰雹具有明显的日变化特征,两者出现时间集中在 15:00—20:00(北京时,下同),分别占到了 57%和 63%,这与秦贺等(2013)统计发现新疆有 51.8%的雷暴过程发生在 17:00—20:00 的结果较为接近。南疆地区有 27%的冰雹发生在 22:00 至次日 08:00,北疆有 18%的冰雹出现在 22:00 至次日 08:00(图 5b)。午后至傍晚强对流多发是由于较强的太阳辐射使得近地面加热迅速,容易形成大气不稳定层结,再加之地形抬升作用,有利于触发大气不稳定能量的释放,若同时高空有干冷空气侵入,有利于冰雹天气系统的发生发展。

夏季冷空气越过天山山脉,先期到达南疆地区的上空,由于天山的阻挡,该区域低层大气持续较暖,下垫面温度较北疆偏高(何毅等,2015;刘丽伟,2015),形成上冷下暖的强不稳定层结,导致南疆地区在凌晨和上午的降雹比例较北疆地区更高。此类强对流形成的机制与物理过程有别于我国东部平原地区。相关研究结果表明,凌晨和上午出现的冰雹持续时间比午后的冰雹过程持续时间短(赵文慧等,2019)。

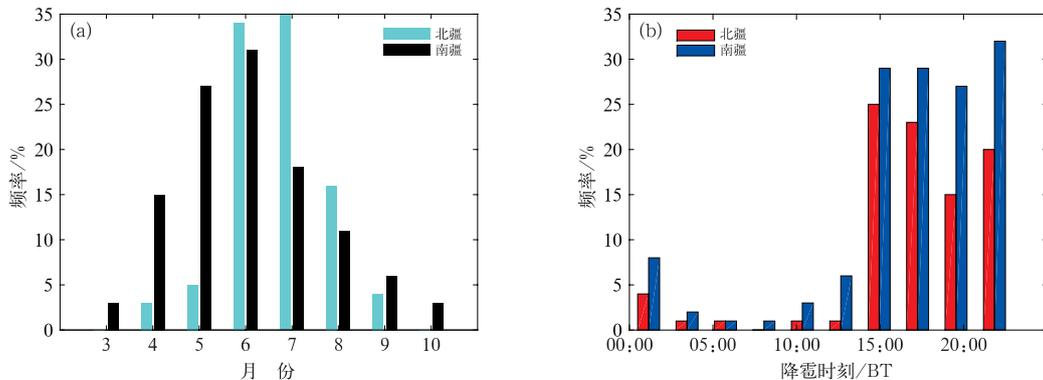


图 5 (a)冰雹出现月份和(b)降雹时刻分布

Fig. 5 Distribution of (a) hail occurrence month and (b) hail time

冰雹造成的危害不仅与降雹范围有关,同降雹持续时间和冰雹尺度等有直接关系。降雹持续时间长短是影响冰雹灾害轻重的因素之一,一般持续时间越长灾害越严重。根据冰雹受灾记录,如图 6a 所示,北疆降雹持续时间为 2~40 min,约 30%降雹时间小于 10 min,超过 30 min 约占 10%,在 10~30 min 的占到了 80%,持续时间平均值为 12.60 min;南疆冰雹持续时间主要分布在 2~30 min,小于 10 min 的个例为 40%,在 10~30 min 的占到了 60%,持续时间平均值为 12.27 min;北疆降雹持续时间较南疆稍大。这与王昀(2021)得出的新疆冰雹事件在 20 min 以内的事件分别占总事件的 95%的结论较为一致。统计结果比渠永兴等(2004)得出的甘肃省冰雹云降雹持续时间平均值(17~32 min)偏小。在图 6b 中北疆和南疆冰雹最大直径分别分布在 5~40 mm 和 5~50 mm,其中直径小于 15 mm 分别占 66%和

71%,冰雹直径集中在 15~35 mm 的个例占比分别约为 32%和 23%,大于 40 mm 分别占到了 2%和 6%,两者冰雹最大直径均值分别为 13.53 mm 和 12.80 mm,北疆比南疆大 5.7%。这与兰州地区 54 例冰雹最大直径分布范围在 5~35 mm,均值为 11.82 mm 的研究结果较为接近(刘治国等,2008)。南北疆冰雹云发展过程中存在的差异,可能与地形、下垫面动力和热力作用的影响有关。

为了解南北疆冰雹云垂直结构特征差异,本文进一步分析了不同地区冰雹云的 T_{top} 、 T_g 、 r_{e-top} 和 r_{e-g} 微物理参量特征。从图 7 可以看出:北疆和南疆的 T_{top} 主要分布在 $-57\sim-45^\circ\text{C}$ 和 $-59\sim-40^\circ\text{C}$ 范围内,北疆的 T_{top} 均值(-52.40°C)比南疆(-49.33°C)低 3.07°C ,而对应的 r_{e-top} 均集中在 $17.9\sim40.0\ \mu\text{m}$,南疆的 r_{e-top} 均值($30.45\ \mu\text{m}$)是北疆均值($27.91\ \mu\text{m}$)的 1.09 倍。北疆冰雹云的云顶更高,云顶粒子较

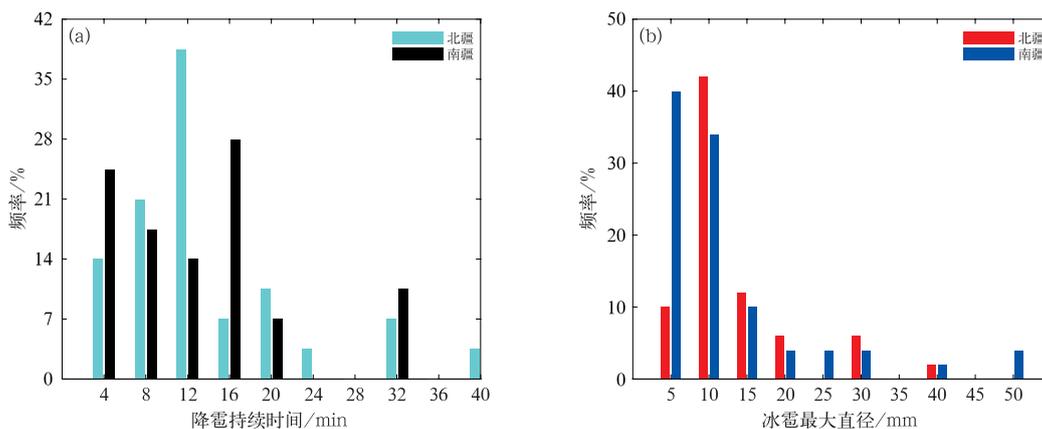


图 6 (a)降雹持续时间和(b)冰雹最大直径分布
Fig. 6 Distribution of (a) hail duration and (b) maximum hail size

小。从 T_g 和 r_{e-g} 值的分布来看,北疆的 T_g 均值为 -31.81°C ,南疆为 -28.45°C , T_g 主要位于 $-40\sim-22^\circ\text{C}$ 和 $-39\sim-21^\circ\text{C}$,对应两者的 r_{e-top} 均值分别是 $33.14\ \mu\text{m}$ 和 $32.8\ \mu\text{m}$, r_{e-top} 分布在 $17.6\sim40.0\ \mu\text{m}$ 与 $26.3\sim40.0\ \mu\text{m}$,可见北疆冰雹云的冻结温度比南疆更低,对应云粒子更大。以上结果是由于北疆较南疆水汽条件好,导致北疆的冰雹云云水含量比南疆更高所致。该分析结果与徐小红等(2022)得出的陕西、山东和贵州等地区冰雹云垂直结构特征较为类似。

人工影响天气作业非常关注云微物理参量演变,以此来估计云的发展阶段,捕捉作业时机、确定

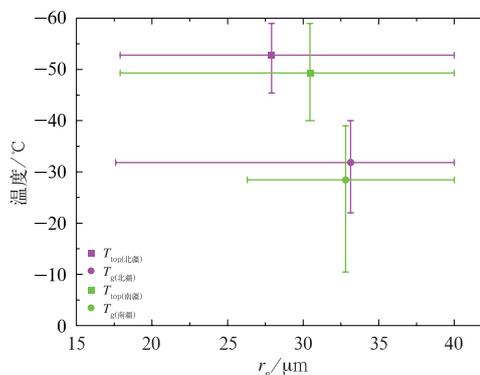
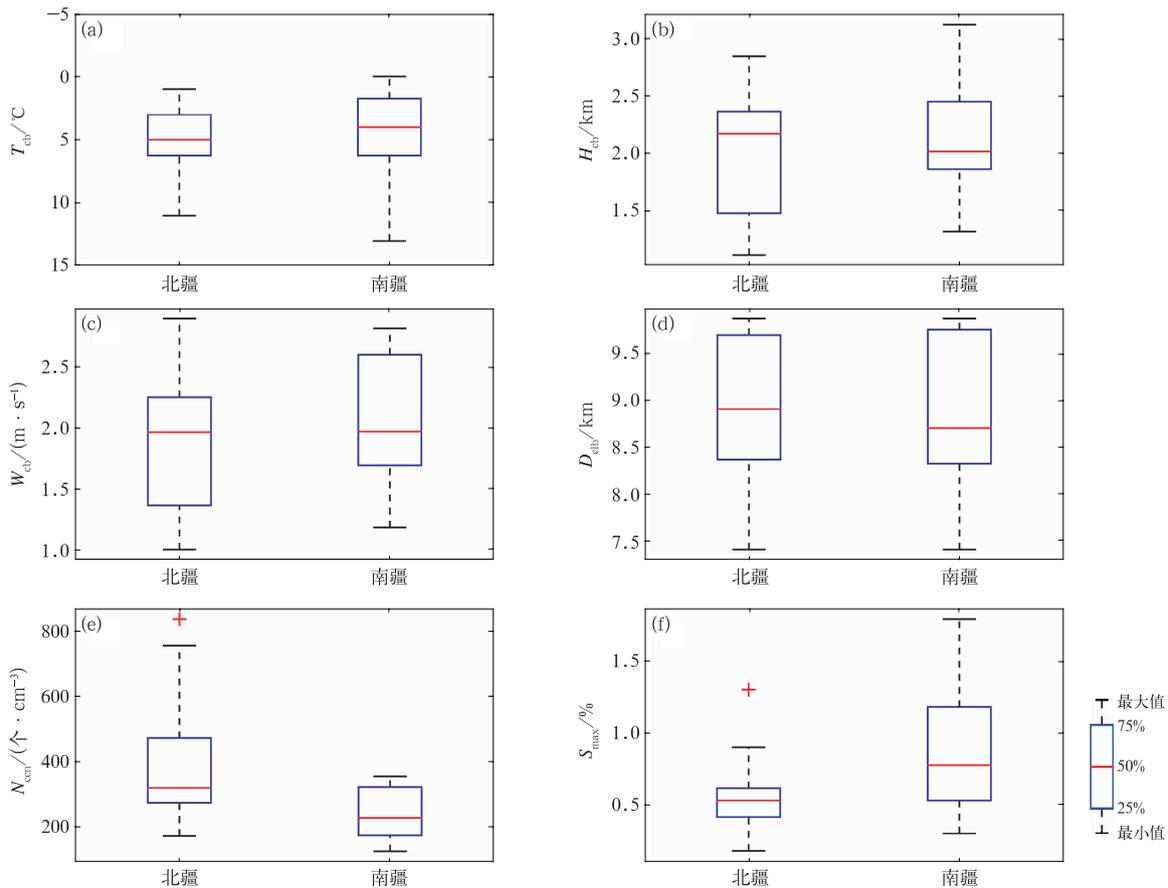


图 7 冰雹云的 T_{top} 和 T_g 均值和偏差分布
Fig. 7 T_{top} and T_g mean and deviation distribution of hail cloud

作业部位、估算催化剂量等。如图 8a,8b 所示,北疆的云底温度(T_{cb})和云底高度(H_{cb})分别集中于 1~11°C 和 1.12~2.85 km,均值分别为 5.15°C 和 1.96 km,标准差分别是 2.58°C 和 0.56 km;南疆 T_{cb} 和 H_{cb} 分别在 0~13°C 和 1.33~3.12 km,均值分别为 4.85°C 和 2.19 km,标准差分别为 4.2°C 和 0.51 km,北疆冰雹的 T_{cb} 比南疆较暖, H_{cb} 则是北疆比南疆低。王昀(2021)统计发现北疆的 0°C 层高度比南疆较低,与本研究结果大体相当。刘贵华(2016)研究得出江西、四川、安徽等地南方对流云 $T_{cb} > 15^\circ\text{C}$, H_{cb} 在 1~2 km,对比发现新疆地区的 H_{cb} 偏高 2 km 左右, T_{cb} 则偏低 10°C 左右。冰雹发生和增长的区域与上升气流的关系极为密切,也是人工防雹的重点关注区域(康风琴等,2004)。云底上升速度(W_{cb})分布见图 8c,北疆 W_{cb} 最大值和最小值分别为 $2.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均值为

$1.84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,标准差为 $0.57 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;南疆分布在 $1.19 \sim 2.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均值为 $2.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,标准差为 $0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南疆的云底上升速度比北疆的高 1.13 倍。北疆下垫面以森林、草原为主,南疆下垫面则多为戈壁、沙地等,增温较快,易激发不稳定层结,促进对流活动产生,受地形和热力抬升的共同作用,天山南侧的对流性不稳定性要大于天山北侧(周嵬等,2005;王存亮等,2013;张磊等,2014;王秋香和任宜勇,2006)。从图 8d 中发现北疆 D_{cld} 分布在 $7.42 \sim 9.87 \text{ km}$,均值为 8.90 km ,标准差为 0.88 km ;南疆分布在 $7.42 \sim 9.87 \text{ km}$,均值为 8.79 km ,标准差是 0.92 km ,北疆的云厚度比南疆大 1.25%。郑旭程等(2018)和王昀(2021)统计发现新疆北部地区冰雹云厚度比南疆要厚,与我国东部地区相比明显偏薄,这与本文结果较为一致。



注: + 表示异常值。

图 8 冰雹云特性参量分布

(a) 云底温度, (b) 云底高度, (c) 云底上升速度, (d) 云厚度, (e) 云底凝结核数浓度, (f) 云底最大过饱和度

Fig. 8 Distribution of hail cloud characteristic parameters

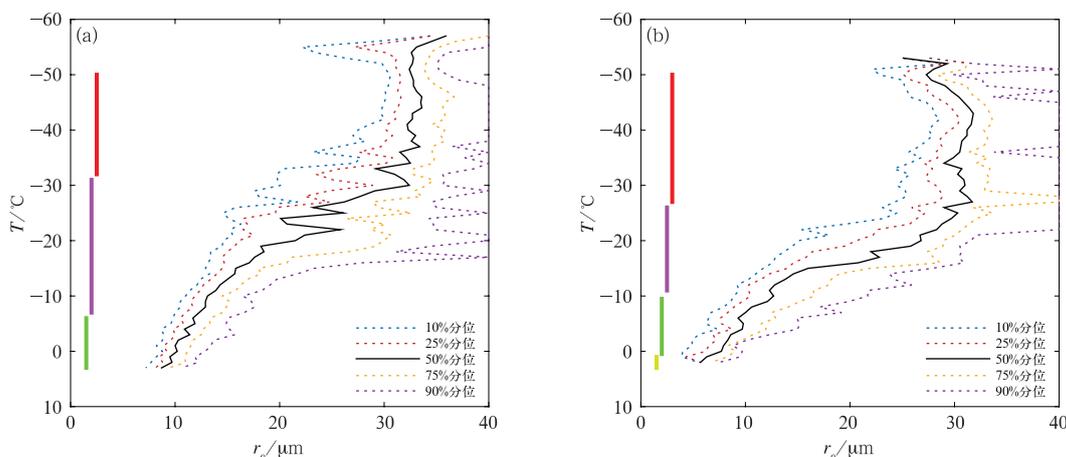
(a) T_{cb} , (b) H_{cb} , (c) W_{cb} , (d) D_{cld} , (e) N_{cen} , (f) S_{max}

云降水过程与大气气溶胶有很重要的关系,部分大气气溶胶可作为水凝物在一定过饱和度下活化并凝结增长形成云滴,活化的气溶胶质粒被称为云凝结核。北疆和南疆的云底凝结核数浓度(N_{ccn} ,图 8e)分别分布在 $173\sim 836$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $126\sim 355$ 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$, N_{ccn} 均值分别为 396 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 240 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$,标准差为 198 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 84 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。北疆的 N_{ccn} 与青海柴达木盆地的反演结果较为接近(岳治国等,2018),同刘贵华(2016)反演得出的南方对流云 N_{ccn} (~ 1000 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$)以及李义宇(2015)通过飞机观测到山西地区 1.5 km 以下的 N_{ccn} 均值为 1900 个 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 等的研究结果相比明显偏小,反映出明显的区域差异。近年来随着天山北坡城镇化的高速发展以及石油、煤炭等化石燃料加工基地的不断扩张(方创琳,2019),受人类活动和工业污染等多重因素影响,北疆地区较以农业为主的南疆地区具有较高的 N_{ccn} 值。石茹琳等(2021)指出雹云发展阶段,云中液水含量随气溶胶浓度增加而增多,中等污染更有利于液相水成物向冰粒子的转化,也更有利于冰雹的生长。刘贵华(2016)指出污染条件下包裹了污染物的较大灰尘粒子成为巨 CCN 粒子,在较湿环境和有利动力条件下可能导致较强的碰并作用,进而有利于冰晶繁生。图 8f 中北疆和南疆的云底最大过饱和度(S_{max})分别分布在 $0.18\%\sim 1.30\%$ 和 $0.30\%\sim 1.79\%$,均值分别为 0.55% 和 0.85% ,标准差分别是 0.27% 和 0.42% ,南疆地区较大的 S_{max} 使云滴凝结增长速率更快,云滴更易通过凝结

增长变大,进而更容易碰并增长,形成降水。

2.3 典型个例分析

文中选取了发生在南北疆冰雹天气高值中心的两次过程,分别是 2016 年 6 月 24 日北疆伊犁州霍城县和 2016 年 9 月 7 日南疆阿克苏地区库车市的两场降雹天气。图 9 为 NPP/VIIRS 卫星反演的 $T-r_e$ 廓线,文中将关注区域内同一温度上所有的云像元按 r_e 从小到大排序,对样本数进行归一化处理,选取了第 10%、25%、50%、75%和 90%分位样本的 r_e 进行分析,用第 50%分位的 r_e 表示总体状况,以此来分析冰雹云的垂直结构。2016 年 6 月 24 日北疆伊犁州霍城县出现冰雹天气过程,从 16:25 开始降雹至 16:35 结束,降雹持续时间为 10 min,冰雹大小为 10 mm,NPP 卫星在 15:11 左右过境观测,该冰雹云发展包含碰并增长过程($-6\sim 3^\circ\text{C}$)、混合相过程($-31\sim -7^\circ\text{C}$)和冰化过程($T_g = -32^\circ\text{C}$),无雨胚形成过程。2016 年 9 月 7 日南疆阿克苏地区库车市发生冰雹天气过程,降雹开始时间为 16:50,截止时间是 16:52,冰雹大小为 10 mm,冰雹云包含凝结增长过程($1\sim 3^\circ\text{C}$)、碰并增长过程($-10.0\sim 0.5^\circ\text{C}$)、混合相过程($-26\sim -11^\circ\text{C}$)和冰化过程($T_g = -27^\circ\text{C}$),无雨胚形成过程。南疆库车市冰雹云晶化温度更暖高度更低,云顶有明显的云粒子随高度减小带。在强上升气流引导下,云粒子从云底到云顶增长时间短,云滴还来不及长大就被带到云顶,导致每个增长带的增长缓慢,无雨胚形成带。这



注:红、紫、绿、黄粗线分别表示冰化、混合相、碰并增长和凝结增长过程。

图 9 2016 年(a)6 月 24 日和(b)9 月 7 日冰雹云 $T-r_e$ 廓线

Fig. 9 Hail cloud $T-r_e$ profile information on (a) 24 June and (b) 7 September 2016

与徐小红等(2012)分析发现冰雹云粒子各增长带增长缓慢、无雨胚带、晶化温度低于 -30°C ,且云顶附近存在明显的有效半径减小带的研究结果较为一致。通过对冰雹云发展各物理过程的分析,有针对性的提前在云中低层播撒吸湿性核,促使云底尽早形成大滴、产生降水,释放能量减缓上升,还能通过大滴提高冰晶繁生能力;同时可以在 -5°C 层附近过量播撒 AgI 冰核,争食云中的过冷水,达到增雨消雹的目的。

3 结论与讨论

利用 NPP/VIIRS 卫星反演技术和云微物理分析方法,对比了新疆地区冰雹云和深对流云的微物理特征,定量分析了南北疆地区冰雹云微物理参量的差异,探讨了人工防雹的可播性和播散方式,得出如下结论:

(1)深对流云和冰雹云粒子 T_g 均值为 -30.5°C 和 -34.0°C , T_{top} 值为 -52.0°C 和 -50.5°C ,冰雹云 T_g 更低,深对流云顶高度更高,冰雹云顶粒子较小,存在砧状云结构,达到冰化温度时,冰雹云粒子 r_{e-g} 未饱和(均值 $33.58\ \mu\text{m}$)。说明冰雹云较深对流云上升气流更强。

(2)北疆地区冰雹多发在 6—7 月,南疆集中在 5—7 月发生,降雹时刻集中在 15:00—20:00,南疆冰雹发生在凌晨和上午的占比较北疆大;北疆和南疆降雹持续时间均值分别为 12.60 min 和 12.27 min,冰雹最大直径均值分别为 13.53 mm 和 12.80 mm,北疆降雹持续时间较长,冰雹更大。

(3)北疆冰雹云的 T_{top} 均值(-52.40°C)比南疆(-49.33°C)低,对应南疆的 $r_{e-\text{top}}$ 均值为 $30.45\ \mu\text{m}$ 是北疆均值 $27.91\ \mu\text{m}$ 的 1.09 倍,北疆冰雹云的云顶更高,云顶粒子较小,冻结温度比南疆更低。充分说明北疆较南疆水汽条件好,导致北疆的冰雹云云水含量比南疆更高。

(4)北疆和南疆的 T_{cb} 、 H_{cb} 均值分别为 5.15°C 、 $1.96\ \text{km}$ 和 4.85°C 、 $2.19\ \text{km}$,表明北疆冰雹云底温度比南疆暖,云底高度比南疆小; W_{cb} 和 D_{cd} 均值为 $1.84\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $8.90\ \text{km}$ 和 $2.07\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $8.79\ \text{km}$,表明云底上升速度南疆是北疆的 1.13 倍,北疆云厚度比南疆大 1.25%;北疆和南疆的 N_{cn} 均值($396\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $240\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和 S_{max} 均值(0.55% 和 0.85%)分布,说明受工业污染等因素影响北疆地区云凝结核浓度更高。

(5)受强上升气流的影响,冰雹云粒子增长时间短,各个增长带发展缓慢,无雨胚形成带。有针对性地提前在云中低层播撒吸湿性核,促使云底尽早形成降水或提高冰晶繁生能力,或者在 -5°C 层附近过量播撒 AgI 冰核,争食云中的过冷水,可实现增雨消雹的目标。

本文仅对南北疆部分典型强对流天气个例进行了对比分析,其中冰雹云的形成与天气过程、地形和地表热力差异等环境因素密切相关,后续的研究中将针对不同天气背景冰雹等强对流天气过程分别展开讨论,以得到更为全面的结果。

参考文献

- 白洁,王洪庆,陶祖钰,1997. GMS 卫星红外云图强对流云团的识别与追踪[J]. 热带气象学报,13(2):158-167. Bai J, Wang H Q, Tao Z Y, 1997. Recognition and tracing of severe convective cloud from IR images of GMS[J]. J Trop Meteor, 13(2):158-167(in Chinese).
- 戴进,余兴,刘贵华,等,2011. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析[J]. 高原气象,30(2):288-298. Dai J, Yu X, Liu G H, et al, 2011. Satellite retrieval analysis on microphysical property of thunderstorm with light precipitation over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 30(2):288-298(in Chinese).
- 范丽红,2006. 新疆天山山区与南、北疆气候变化及其影响的比较研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学. Fan L H, 2006. Study on comparison of the climatic variations and its effects in Tianshan Mountainous area, Southern and Northern Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University(in Chinese).
- 范思睿,王维佳,刘贵华,等,2021. 基于 NPP 卫星反演四川盆地夏季云降水微物理特征[J]. 成都信息工程大学学报,36(4):467-471. Fan S R, Wang W J, Liu G H, et al, 2021. Retrieval of microphysical properties of summer cloud precipitation in Sichuan Basin based on NPP satellite data[J]. J Chengdu Univ Informat Technol, 36(4):467-471(in Chinese).
- 方创琳,2019. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局[J]. 干旱区地理,42(1):1-11. Fang C L, 2019. Strategic thinking and spatial layout for the sustainable development of urban agglomeration in northern slope of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geogr, 42(1):1-11(in Chinese).
- 何毅,杨太保,陈杰,等,2015. 1955—2012 年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J]. 水土保持研究,22(2):269-277. He Y, Yang T B, Chen J, et al, 2015. Long-term trend of temperature, precipitation and relative humidity in the northern and southern regions of the Xinjiang from 1955 to 2012[J]. Res Soil Water Conserv, 22(2):269-277(in Chinese).
- 蒋慧敏,刘春云,贾健,等,2019. 新疆夏季对流性降水时空分布特征及成因分析[J]. 高原气象,38(2):340-348. Jiang H M, Liu C Y, Jia J, et al, 2019. The temporal and spatial characteristics of convective precipitation in Xinjiang among the summer and causes analysis[J]. Plateau Meteor, 38(2):340-348(in Chinese).

- 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):735-742. Kang F Q, Zhang Q, Qu Y X, et al, 2004. Simulating study on hail microphysical process on the northeastern side of Qinghai-Xizang Plateau and its neighbourhood[J]. Plateau Meteor, 23(6):735-742 (in Chinese).
- 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 Y, Zheng Y G, Mao D Y, et al, 2014. Classification and satellite nephogram features of hail weather in North China[J]. J Appl Meteor Sci, 25(5):538-549(in Chinese).
- 李义宇,2015. 华北夏季气溶胶与云微物理特征的飞机观测研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Li Y Y, 2015. Aircraft observational study on aerosol and cloud microphysical properties in northern China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 李照荣,丁瑞津,董安祥,等,2005. 西北地区冰雹分布特征[J]. 气象科技,33(2):160-162,166. Li Z R, Ding R J, Dong A X, et al, 2005. Characteristics of hail distribution in Northwest China[J]. Meteor Sci Technol, 33(2):160-162,166(in Chinese).
- 刘德祥,白虎志,董安祥,2004. 中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究[J]. 高原气象,23(6):795-803. Liu D X, Bai H Z, Dong A X, 2004. Studies on climatic characteristic and anomaly of hail in Northwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6):795-803 (in Chinese).
- 刘贵华,2016. 卫星反演我国南方对流云物理特征的初步分析[C]//第 33 届中国气象学会年会 S15 人工影响天气关键技术与业务应用. 西安:中国气象学会:129. Liu G H, 2016. Preliminary analysis of satellite retrieval of the physical characteristics of convective clouds in southern China[C]//Key Technologies and Operational Applications of S15 Weather Modification at the 33rd Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Xi'an: Chinese Meteorological Society:129(in Chinese).
- 刘贵华,余兴,岳治国,等,2012. 卫星遥感人工增雨作业条件 II: 层状云[J]. 气候与环境研究,17(6):758-766. Liu G H, Yu X, Yue Z G, et al, 2012. Seeding conditions of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite. II: super-cooled layer clouds[J]. Climate Environ Res, 17(6):758-766 (in Chinese).
- 刘丽伟,2015. 北疆地区雷暴(冰雹)潜势预报研究[D]. 兰州:兰州大学. Liu L W, 2015. Study on the potential prediction of thunderstorm and hail in northern Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 刘治国,田守利,邵亮,等,2008. 冰雹云垂直累积含水量密度与降雹大小的关系研究[J]. 干旱气象,26(3):22-28. Liu Z G, Tian S L, Shao L, et al, 2008. Correlation between the vertically integrated water content density of hail cloud and the hail diameter on the ground[J]. Arid Meteor, 26(3):22-28(in Chinese).
- 秦贺,陈春艳,霍文,等,2013. 1999—2008 年新疆雷暴活动特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,7(6):63-67. Qin H, Chen C Y, Huo W, et al, 2013. Analysis of thunderstorm activity characteristics in Xinjiang from 1999 to 2008[J]. Desert Oasis Meteor, 7(6):63-67(in Chinese).
- 渠永兴,2004. 甘肃省冰雹云研究综述[J]. 干旱气象,22(1):80-85. Qu Y X, 2004. The overview of study on hailstorm in Gansu[J]. Arid Meteor, 22(1):80-85(in Chinese).
- 渠永兴,张强,康凤琴,2004. 甘肃永登强对流云的雷达气候学特征分析[J]. 高原气象,23(6):773-780. Qu Y X, Zhang Q, Kang F Q, 2004. Radar climatic characteristics of severe convective cloud in Yongdeng, Gansu[J]. Plateau Meteor, 23(6):773-780 (in Chinese).
- 热苏力·阿不拉,牛生杰,阿不力米提江·阿布力克木,等,2015. 新疆冰雹分区预报方法研究[J]. 冰川冻土,37(4):1041-1049. Abera G, Niu S J, Abulikemu A, et al, 2015. Study of the method of partitioned hail forecast in Xinjiang Region[J]. J Glaciol Geocryol, 37(4):1041-1049(in Chinese).
- 石茹琳,银燕,陈倩,等,2021. 气溶胶对新疆冰雹形成物理过程影响的数值模拟研究[J]. 大气科学,45(1):107-122. Shi R L, Yin Y, Chen Q, et al, 2021. Numerical simulation of aerosol effects on the physical processes of hail formation in Xinjiang[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1):107-122(in Chinese).
- 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 Q, Wang J X, Fu Z, et al, 2019. Characteristic of precipitation and lightning activity of a hailstorm event in Gansu Province[J]. J Arid Meteor, 37(3):400-408(in Chinese).
- 孙继松,2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热力学过程[J]. 气象,49(1):1-11. Sun J S, 2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales[J]. Meteor Mon, 49(1):1-11(in Chinese).
- 王存亮,魏勇,彭军,等,2013. 新疆天山北坡中部一次强对流天气的多普勒雷达特征[J]. 干旱气象,31(2):354-361. Wang C L, Wei Y, Peng J, et al, 2013. Analysis of doppler radar echo characteristic of a strong convective weather process in the middle part of the north slope of Tianshan Mountain[J]. J Arid Meteor, 31(2):354-361(in Chinese).
- 王飞,李集明,姚展予,等,2022. 我国人工增雨作业效果定量评估研究综述[J]. 气象,48(8):945-962. Wang F, Li J M, Yao Z Y, et al, 2022. Advances of quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China[J]. Meteor Mon, 48(8):945-962(in Chinese).
- 王秋香,任宜勇,2006. 51 a 新疆雹灾损失的时空分布特征[J]. 干旱区地理,29(1):65-69. Wang Q X, Ren Y Y, 2006. Temporal and spatial distribution features of hail disasters in Xinjiang in recent 51 years[J]. Arid Land Geogr, 29(1):65-69(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,费海燕,等,2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. 气象,49(2):129-145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. Meteor Mon, 49(2):129-145(in Chinese).
- 王昀,2021. 新疆天山两侧冰雹外场探测和预报预警指标研究[D]. 兰州:兰州大学. Wang Y, 2021. Field observations and studies of forecast & warning indicators of hailstorms on both sides of Mt. Tian in Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 尉英华,花家嘉,王莹,等,2023. 近 11 年天津冰雹统计特征及对流参数指标分析[J]. 气象,49(2):213-223. Wei Y H, Hua J J, Wang Y, et al, 2023. Statistical characteristics and convection indicators of

- hailstorm over Tianjin in recent 11 years[J]. Meteor Mon, 49 (2):213-223(in Chinese).
- 夏凡, 吴炜, 张乐坚, 等, 2023. 基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算法的研究[J]. 气象, 49(2):146-156. Xia F, Wu W, Zhang L J, et al, 2023. Study of designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 49 (2):146-156(in Chinese).
- 徐小红, 余兴, 刘贵华, 等, 2022. 冰雹云卫星早期识别与自动预警[J]. 大气科学, 46(1):98-110. Xu X H, Yu X, Liu G H, et al, 2022. Early identification and automatic warning of hail clouds by satellite[J]. Chin J Atmos Sci, 46(1):98-110(in Chinese).
- 徐小红, 余兴, 朱延年, 等, 2012. 卫星遥感人工增雨作业条件 I: 对流的云[J]. 气候与环境研究, 17(6):747-757. Xu X H, Yu X, Zhu Y N, et al, 2012. Seeding condition of precipitation enhancement revealed by multiple spectral data of satellite. I: convective clouds[J]. Climate Environ Res, 17(6):747-757(in Chinese).
- 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等, 2018. NPP/VIIRS 卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征[J]. 气象学报, 76(6):968-982. Yue Z G, Yu X, Liu G H, et al, 2018. NPP/VIIRS satellite retrieval of summer convective cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 76(6):968-982(in Chinese).
- 张杰, 张强, 康凤琴, 等, 2004. 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 J, Zhang Q, Kang F Q, et al, 2004. Satellite spectrum character of hail cloud and pattern of remote sensing monitor in east of North-west China[J]. Plateau Meteor, 23(6):743-748(in Chinese).
- 张磊, 张继东, 热苏力·阿不拉, 2014. 南疆阿克苏冰雹天气的判别指标研究[J]. 干旱气象, 32(4):629-635. Zhang L, Zhang J D, Abela R, 2014. Analysis on identifying indexes of hail weather process in Akesu of the Southern Xinjiang[J]. J Arid Meteor, 32 (4):629-635(in Chinese).
- 张强, 孙昭萱, 陈丽华, 等, 2009. 祁连山空中云水资源开发利用研究综述[J]. 干旱区地理, 32(3):381-390. Zhang Q, Sun Z X, Chen L H, et al, 2009. Reviews on studies of exploitation and utilization of cloud-water resource in the Qilian Mountains Region[J]. Arid Land Geogr, 32(3):381-390(in Chinese).
- 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 W H, Yao Z Y, Jia S, et al, 2019. Characteristics of spatial and temporal distribution of hail duration in China during 1961-2015 and its possible influence factors[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3):539-551(in Chinese).
- 郑旭程, 达布希拉图, 苏立娟, 等, 2018. 冰雹发生的天气环境条件及识别指标[J]. 干旱区资源与环境, 32(12):117-122. Zheng X C, Dabushilat, Su L J, et al, 2018. Environmental conditions and identification index factors of hail clouds[J]. J Arid Land Resour Environ, 32(12):117-122(in Chinese).
- 郑永光, 陈炯, 朱佩君, 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J]. 科学通报, 53(4):471-481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. Chin Sci Bull, 53(4):471-481(in Chinese).
- 周崑, 张强, 康凤琴, 2005. 我国西北地区降雹气候特征及若干研究进展[J]. 地球科学进展, 20(9):1029-1036. Zhou W, Zhang Q, Kang F Q, 2005. Recent advancements of hail research in North-west China[J]. Adv Earth Sci, 20(9):1029-1036(in Chinese).
- Hillger D, Kopp T, Lee T, et al, 2013. First-light imagery from suomi NPP VIIRS[J]. Bull Amer Meteor Soc, 94(7):1019-1029.
- Miller S D, Hawkins J D, Kent J, et al, 2006. NexSat: previewing NPOESS/VIIRS imagery capabilities[J]. Bull Amer Meteor Soc, 87(4):433-446.
- Qie X S, Wei L, Zhu K X, et al, 2022. Regional differences of convection structure of thunderclouds over the Tibetan Plateau[J]. Atmos Res, 278:106338.
- 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, Fischman B, Zheng Y T, et al, 2014a. Combined satellite and radar retrievals of drop concentration and CCN at convective cloud base[J]. Geophys Res Lett, 41(9):3259-3265.
- Rosenfeld D, Liu G, Yu X, et al, 2014b. High-resolution (375 m) cloud microstructure as seen from the NPP/VIIRS satellite imager[J]. Atmos Chem Phys, 14(5):2479-2496.
- 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 Atmos, 113(D4):D04208.
- Rosenfeld D, Zheng Y T, Hashimshoni E, et al, 2016. Satellite retrieval of cloud condensation nuclei concentrations by using clouds as CCN chambers[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 113(21):5828-5834.
- Setvák M, Rabin R M, Doswell III C A, et al, 2003. Satellite observations of convective storm tops in the 1.6, 3.7, and 3.9 μm spectral bands[J]. Atmos Res, 66/68:607-627.
- Wu X K, Liu B, Cao H L, et al, 2022. Responses of extreme convective storms in the southern Himalayan front to the Indian summer monsoon[J]. Atmos Res, 269:106026.
- Yue Z G, Rosenfeld D, Liu G H, et al, 2019. Automated mapping of convective clouds (AMCC) thermodynamical, microphysical, and CCN properties from SNPP/VIIRS satellite data[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(4):887-902.
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. Chin Sci Bull, 53(10):1574-1586.
- Zheng Y T, Rosenfeld D, Li Z Q, 2015. Satellite inference of thermals and cloud-base updraft speeds based on retrieved surface and cloud-base temperatures[J]. J Atmos Sci, 72(6):2411-2428.
- Zhu Y N, Rosenfeld D, Yu X, et al, 2014. Satellite retrieval of convective cloud base temperature based on the NPP/VIIRS imager[J]. Geophys Res Lett, 41(4):1308-1313.

(本文责编:俞卫平)