大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

云粒子的破碎对积层混合云微物理参量测量的影响

黄敏松 雷恒池

Cloud Particle Shattering and Its Impact on Cloud Microphysical Parameters' Measurement in Stratiform Clouds with Embedded Convection

HUANG Minsong LEI Hengchi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19255

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究

Airborne Observations of Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Over Eastern Side of Taihang Mountains

大气科学. 2021, 45(1): 88 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19202

基于机载Ka波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征

The Properties of Convective Generating Cells Embedded in the Stratiform Cloud on Basis of Airborne Ka-Band Precipitation Cloud Radar and Droplet Measurement Technologies

大气科学. 2020, 44(5): 1023 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19185

基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究

Numerical Simulation Study on the Microphysical Characteristics of Stratiform Clouds with Embedded Convections in Northern China based on Aircraft Measurements

大气科学. 2020, 44(5): 899 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1908.19114

华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究:对流云对流泡和融化层结构特征

大气科学. 2019, 43(6): 1365 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18220

机载云降水粒子成像仪所测数据中伪粒子的识别

Pseudo Particle Identification in the Image Data from the Airborne Cloud and Precipitation Particle Image Probe

大气科学. 2017, 41(5): 1113 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16259

青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征

Cloud Microphysics and Regional Water Budget of a Summer Precipitation Process at Naqu over the Tibetan Plateau

大气科学. 2018, 42(6): 1327 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17202

关注微信公众号，获得更多资讯信息

黄敏松, 雷恒池. 2021. 云粒子的破碎对积层混合云微物理参量测量的影响 [J]. 大气科学, 45(2): 369−378. HUANG Minsong, LEI Hengchi. 2021. Cloud Particle Shattering and Its Impact on Cloud Microphysical Parameters' Measurement in Stratiform Clouds with Embedded Convection [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(2): 369−378. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19255

云粒子的破碎对积层混合云微物理参量测量的影响

黄敏松[1, 2, 3, 4] 雷恒池[1]

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室，北京 100029
2 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室，南京 210044
3 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心，南京 210044
4 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室，北京 100081

摘 要 由层状云和镶嵌在层状云中的对流单体组成的积层混合云系是一种重要的降水系统，为研究云粒子破碎对积层混合云系中对流较强区域和层云区域中的云微物理参量测量影响的差异，本文提出了一个时变阈值的破碎粒子识别方法，并利用该方法研究了破碎云粒子在层云区域与对流区域对云微物理参量测量影响的异同。经研究发现破碎粒子对粒子谱影响在小粒径端（500 μm 以下）和大粒径（1000 μm 以上）两端都存在，其中在层云区，破碎粒子在小粒径端的主要影响位于 300 μm 以下，而在对流云区，主要影响的小粒径段位于 500 μm 以下。就整体平均而言，破碎粒子对对流云区粒子谱的影响要比对层云区的影响高出 20% 以上。在粒子数浓度测量上，破碎粒子对整个层云区粒子数浓度影响的平均值是 4.56 倍，对整个对流云区粒子数浓度影响的平均值是 8.47。与层云区相比，破碎云粒子对对流云区的粒子数浓度影响更大，其影响程度就平均而言接近 2 倍的关系。在冰水含量测量上，破碎粒子对整个层云区冰水含量测量影响的平均值是 1.34 倍，对整个对流云区冰水含量测量影响的平均值是 1.74 倍。与层云区相比，破碎云粒子对对流云区的冰水含量测量影响大约增加了 30%。

关键词 层状云 嵌入式对流 破碎粒子 云微物理
文章编号 1006-9895(2021)02-0369-10 **中图分类号** P413 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19255

Cloud Particle Shattering and Its Impact on Cloud Microphysical Parameters' Measurement in Stratiform Clouds with Embedded Convection

HUANG Minsong[1, 2, 3, 4] and LEI Hengchi[1]

1 *Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

收稿日期 2019-12-30；**网络预出版日期** 2020-08-21
作者简介 黄敏松，男，1983 年出生，博士，高级工程师，主要从事云降水物理、大气探测研究。E-mail: mission@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507900，国家自然科学基金项目 41775166、41705142，南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室与江苏省气象传感网技术工程中心开放基金项目 KDXS1803，中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题 2020Z007
Funded by National Key R&D Program of China (Grant 2018YFC1507900), National Natural Science Foundation of China (Grants 41775166, 41705142), Joint Program from Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, and Jiangsu Technology and Engineering Center of Meteorological Sensor Network, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China (Grant KDXS1803), Program from Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration (LCP/CMA) (Grant 2020Z007)

3 *Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

4 *Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract The stratiform clouds with embedded convective cells is an important precipitation system. Precise knowledge on the microphysical structure of the clouds can be very useful for the development of the weather numerical prediction model and the cloud water resource. In our study, a time-variant threshold method to identify the shattered fragments is proposed to study the different influence of the shattered particles on the microphysical measurement in the stratiform cloud region and the convection cloud region. Then the shattered impact on the particle spectrum distribution (PSD), particle number concentration, and ice water content measurement is analyzed. It is found that the influence of the shattered artifacts on the PSD can be in the two ends (<500 μm and >1000 μm). In the stratiform area the influence on the small end is less than 300 μm, while in the convective area it is less than 500 μm. On average, the shattered particles have 20% higher impact on the PSD in the convective region than that in the stratiform region. The shattered fragments can increase the particle number concentration by 4.56 times in the stratiform area while in the convective area the value is 8.47 times, which is nearly twice that of the stratiform area. The shattered artifacts can also overestimate the ice water content in the convective region more than 30% than that in the stratus.

Keywords Stratiform clouds, Embedded convection, Shattered particle, Cloud microphysics

1 引言

积层混合云系是一种重要的降水系统，也是我国人工影响天气作业的主要作业对象（黄美元等, 1987; 洪延超, 1996）。它是由层状云和镶嵌在层状云中的对流单体组成，这使得其降水形成过程要比一般的层状云更为复杂，比如发生于其内的微物理过程，尤其冰晶繁生过程还是强降水发生的先决条件（Hallett and Mossop, 1974; Rangno and Hobbs, 2005）。但是当前在云分辨模式和数值天气预报模式中积层混合云的表示具有显著的不确定性，因为许多发生于其内的过程还未得到充分的理解（Morrison et al., 2009）。因此，准确获取积层混合云系的云微物理结构特征，有助于对该云系中云降水关键微物理的发生发展过程的了解。

飞机观测是研究积层混合云结构和降水机理的重要途径。云中微物理过程，尤其是其冰晶粒子属性及其变化过程主要利用机载云粒子测量仪器（Jiang et al., 2019），特别是云粒子成像仪器进行测量。但现有研究表明机载云微物理测量过程中，云粒子进入测量仪器的采样区前，会因与测量仪器的探测臂发生机械碰撞，或者与仪器外壳产生的湍流和风切变相互作用而破碎，云粒子破碎的结果使得小云粒子数偏多，而大云粒子数偏少，从而对云微物理参量的测量造成影响（Field et al., 2003, 2006; Korolev and Isaac, 2005; Korolev et al., 2011, 2013a, 2013b; Jackson et al., 2014; Jackson and McFarquhar, 2014）。为了研究和减少云粒子破碎对云微物理参量测量的影响，Field et al.（2006）分析了破碎的云粒子与自然云粒子一起组成的到达时间间隔分布，发现了该时间分布具有双模态结构，进一步的研究还发现长时间模态表示的是真实的云内部结构，而短时间模态则是由破碎的云粒子所致，对不同航次资料处理分析，他采用不同的时间阈值作为破碎粒子的识别方法。Korolev et al.（2013a）则对探头结构进行了改进，经飞行探测实验对比，发现改进的结构能有效地减少破碎粒子发生的概率，但无法完全消除。Jackson et al.（2014）和 Jackson and McFarquhar（2014）则利用 Field et al.（2006）所提出的破碎粒子滤除算法对粒子破碎及其云微物理参量测量影响进行初步的量化分析。黄敏松等（2016, 2017）对机载测量过程中破碎粒子问题进行了分析，提出了适合于以运-12 飞机为机载平台的破碎粒子识别阈值。

在我国云物理飞机探测的主要机型是中航哈飞的运-12 飞机（Zhao and Lei, 2014a; Yang et al., 2017），近年来云微物理测量飞机上主要安装的是美国粒子测量技术公司（Droplet Measurement Technology, DMT）所生产的云粒子成像仪（Cloud Imaging Probe, CIP）和降水粒子成像仪（Precipitation Imaging Probe, PIP）。作业探测的主要云型是积层混合云系（张佃国等, 2011; 朱士超和郭学

良, 2014; Zhao and Lei, 2014b; 秦彦硕等, 2017）。积层混合云系内由于嵌入式对流单体中液态水含量比周围的层云高，且具有一定的上升气流速度，因此可以产生更多的冰晶（Hobbs and Rangno, 1990）。此外，在嵌入式对流单体下方降水量一般比周围区域高（Hobbs and Locatelli, 1978），因此准确获取该云系的云微物理结构特征，可以更好地了解云系中云降水关键微物理的发生发展过程，从而可更好地开发空中云水资源，缓解我国干旱缺水的状况。机载测量过程中的破碎粒子已经影响到了云微物理参量数值的准确性，尽管云粒子破碎对云微物理参量测量的影响已经有相关的研究成果（Korolev et al., 2013b; Jackson et al., 2014; Jackson and McFarquhar, 2014），但是对于在积层混合云系环境条件下的破碎云粒子对云微物理参量测量的影响并未得到充分的研究，尤其是在层云条件下和积云对流条件下云粒子破碎对云微物理参量测量的影响异同研究尚处于空白。影响云粒子这一非自然破碎的因素除了与云粒子的自身的大小、形状等自身因素有关外，还与温度、气压等环境因素和仪器与飞机的配置、空速、采样时的飞机状态等因素有关（Korolev et al., 2013b）。因此，研究以运-12 飞机为机载测量平台的云粒子破碎识别及其对积层混合云的云微物理参量测量的影响，尤其是研究在层云条件下和积云对流条件下粒子破碎对云微物理参量测量的影响异同依然具有其重要的科学意义。但目前对于破碎的云粒子对以运-12 飞机为机载测量平台的积层混合云云微物理参量测量的影响了解的还不是很多，因此很有必要对此进行研究，以准确获取该云系关键微物理过程的特征。

基于此，本文首先对云粒子破碎后的粒子到达时间间隔模态进行分析，针对实际云中不同部位粒子数浓度的差异性，提出了一个时变的到达时间间隔阈值方法以对测量过程中破碎的云粒子进行识别，然后利用山西运-12 飞机在“环北京云观测试验”期间的飞行探测数据，分析在层云条件下和积云对流条件下云粒子破碎对云微物理参量测量的影响。

2　数据与仪器

利用 2009 年 4～5 月“环北京云观测试验”期间山西人影办的运-12 飞机的观测数据来研究云粒子破碎对云微物理参量测量的影响。该试验是中国第一次利用三架飞机同时对云进行联合观测的试验，但考虑到影响云粒子破碎的因素众多，这里只选择山西人影办的运-12 飞机上 CIP 仪器所测数据进行研究，以分析研究层云条件下和对流条件下云粒子破碎对云微物理参量测量影响的异同。试验期间有两次锋面系统过境，分别在 4 月 18 日和 5 月 1 日，主要云系以积层混合云为主。其中 4 月 18 日天气是高空低槽和地面弱冷锋共同影响下形成的锋面降水过程，张家口气象站观测的 24 h 降水量为 6.7 mm；而 5 月 1 日的天气是在西风槽控制下的锋面降水过程，整个观测区内 24 h 降水量为 6～10 mm（朱士超和郭学良, 2014）。三架飞机分别在不同高度对云系进行观测，其中山西人影办的运-12 飞机在两次探测过程中均主要在 4200 m 高度层飞行探测，两次航测时探测区温度范围分别为−4～−5°C 和 −7.2～−11.6°C。

文献（朱士超和郭学良, 2014）在研究积层混合云内冰晶粒子形状分布和增长状况特征时综合利用飞机观测到的相对湿度、液态水含量和温度以及地面雷达回波的反射率等物理参量而对云中的层云区和积云区进行了划分，这里借鉴朱士超和郭学良（2014）的工作，拟选择 4 月 18 日航测时段 17:41～17:54（北京时，下同）和 5 月 1 日航测时段 09:23～10:35 这两个时段内的航测数据来进行对比分析研究，其中 4 月 18 日所选时段内属于层云区有两段，属于对流云区有 1 段，5 月 1 日所选时段内属于层云区有三段，属于对流云区有三段，具体云区时段及其代号请参见表 1，所选时段内仪器所测粒子图像如图 1 所示，从图中可知所选时段内云相皆为冰相。所选时段的云中相对湿度、液态水含量和温度以及地面雷达回波的反射率值请参见朱士超和郭学良（2014）中的图 9 和图 11。

表 1　所选时间内所对应的云区属性

Table 1　Cloud type in the selected time

航次	时间	云区属性	代号
20090418	17:44:30～17:46:30	层云	S1
20090418	17:48:00～17:50:00	对流云	C1
20090418	17:51:00～17:54:00	层云	S2
20090501	09:23:00～09:25:00	层云	S3
20090501	09:28:00～09:45:00	对流云	C2
20090501	09:46:00～09:51:00	层云	S4
20090501	09:52:00～10:15:00	对流云	C3
20090501	10:15:30～10:23:30	层云	S5
20090501	10:25:00～10:26:30	对流云	C4

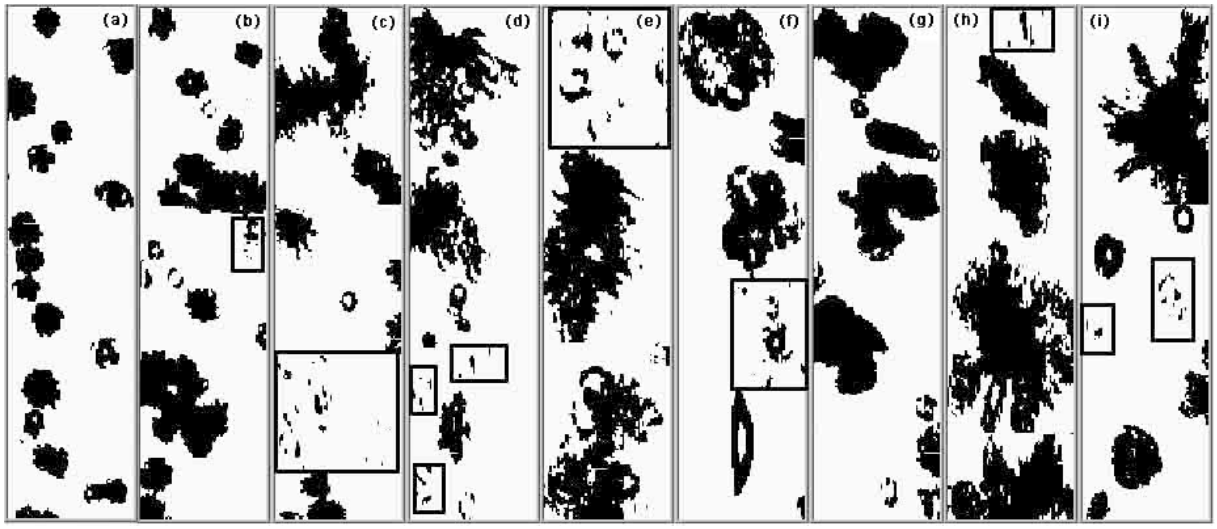

图 1 所选时段内云粒子成像仪 (CIP) 所测云中粒子图像：（a）S1；（b）C1；（c）S2；（d）S3；（e）C2；（f）S4；（g）C3；（h）S5；（i）C4。黑色方框内为测量时所产生的破碎云粒子

Fig. 1 Cloud particle images measured by Cloud Imaging Probe (CIP) in the selected time (a) S1, (b) C1, (c) S2, (d) S3, (e) C2, (f) S4, (g) C3, (h) S5, (i) C4. The shattered particles produced during measurement are highlighted in the black box

3 云粒子破碎的识别方法

3.1 云粒子到达时间间隔

航测过程中，云粒子一旦进入仪器采样区而被采样时，仪器就会自动记录下粒子进入采样区的时刻，即云粒子的到达时间。如果对前后两个云粒子的到达时刻值作差，所得差值即称为“云粒子到达时间间隔”(Inter-Arrival Time, IAT)。对某一航次或某段时间内探测到的云粒子到达时间间隔进行统计，则可获得该时间段内的云粒子到达时间间隔频率分布状况,对文中所选时段 S1 和 C1 的粒子到达时间间隔进行统计，所统计的粒子出现频数随到达时间间隔分布特征如图 2 所示，从图中可看出 C1 时段，即图 2b 具有更加明显的双模态特征。如果该探测时段内存在粒子破碎，则该时间间隔分布将具有明显的双模态特征。长短时间模态不同反映出它们之间物理学上差异。长时间模态是自然云粒子在云中动力热力作用下分布的结果，而短时间模态则是云粒子破碎所致（Field et al., 2003, 2006）。因此，可通过分析这一双模态特征获取一个时间阈值来对破碎云粒子进行识别和剔除。

3.2 时变阈值方法

实际云中不同部位云粒子浓度是不同的，云与云之间的浓度差异就更大了。但现有的工作要么是对一个航测过程进行统一分析后采用一个统一的阈值来对破碎粒子进行剔除（Field et al., 2003, 2006），要么则是对某一机型的航测结果采用一个具有统计意义的阈值进行剔除（黄敏松等, 2016, 2017）。而影响云粒子这一非自然破碎的因素除了与云粒子的自身的大小、形状等自身因素有关外，还与温度、气压等环境因素和空速、采样时的飞机状态等因素有关（Korolev et al., 2013b）。因此，破碎粒子识别需要考虑到云层内部结构的多变性和复杂性，这对阈值识别的时变性提出了要求。为此为研究积层混合云中层云条件下和嵌入式对流条件下云粒子破碎对云微物理参量测量的影响，本文提出了一个时变的阈值分析方法，具体步骤如下：

（1）读取待分析数据，获取单粒子图像帧信息以及该粒子图像帧的到达时刻；

（2）以 10 s 为一个间隔周期，对该周期内满足粒子数条件的粒子到达时间间隔阈值进行直方图统计；

（3）利用多项式拟合方法对统计后的粒子到达时间间隔分布模态进行拟合；

（4）对拟合后的粒子到达时间间隔分布模态进行破碎粒子分布模态的确定，如符合双模态的分布特征，则以短模峰值的 2 倍为破碎粒子识别阈值；

（5）利用确定出的到达时间间隔阈值对统计周期内的破碎粒子进行识别。

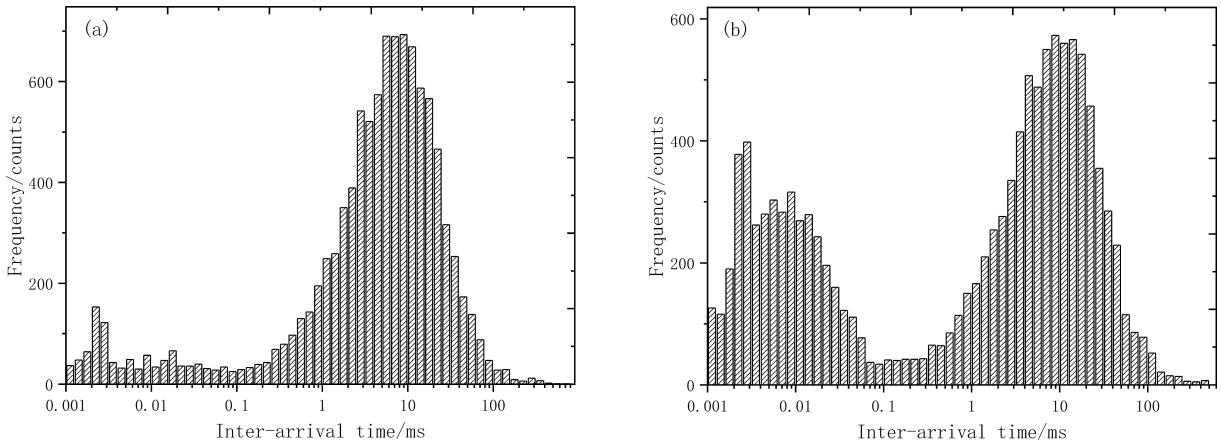

图 2　20090418 航次两个时段的粒子到达时间间隔统计：（a）S1；（b）C1

Fig. 2　Statistics of the cloud particle inter-arrival time in the two selected times of the 20090418 flight: (a) S1; (b) C1

上述方法中通过对时间尺度和粒子数两方面的约束，可以使得获取的到达时间间隔阈值更具有统计的物理意义并符合云中实际的物理状况。其中间隔周期选择为 10 s，粒子数条件为 600，因为机载云粒子成像测量探头所测数据的应用上一般还需对测量的结果进行进一步的平均处理以获取一个更长时间尺度上的代表值。从现有文献上看，这个时间尺度可以是 10 s，20 s 或者 60 s 等，但最常见的是 10 s，这个跟具体的研究情况有关。因此针对统计平均的需要，需要对统计平均的时间尺度上对破碎粒子进行识别，否则统计的平均值将混杂着破碎粒子。事实上，如果时间间隔越短，也许会更有利于统计获取的真值，但是这个涉及到统计量是否足够以及整个程序的运算时间问题，因此 10 s 是一个较优的折衷选择。粒子数条件的选择是基于统计样本量的需求，一般要在 100 个以上，样本量越多越有利于统计获取的真值，但综合考虑到统计的时间尺度、仪器的采样体积以及实际云中冰晶粒子数浓度等情况，这里将粒子数条件设定为 600。

具体的拟合公式为

$$f_i = \sum_{j=0}^{m} a_j x_i^j, \qquad (1)$$

其中，f_i 表示的是输出的拟合序列，x 表示输入序列，a 则表示多项式的系数，m 表示拟合多项式的阶数，这里选择为 5.

利用上述方法对文中所选的 S1 时段和 C1 时段进行时变阈值的统计分析，可获取相应短周期内的时间间隔阈值，这里给出所选 S1 时段和 C1 时段的第一个短周期的统计和曲线拟合结果，如图 3 所示，其中 S1 时段内第一个短周期的时间间隔阈值是 0.01 ms，而 C1 时段内第一个短周期的时间间隔阈值是 0.02 ms。

4　破碎粒子对云微物理参量测量的影响

云微物理参量是表征云微观特征的参量，获取准确的云微物理参量信息是理解云降水物理发展过程的前提，因此研究云粒子破碎对云微物理参量测量的影响将非常有助于对云和降水发展变化过程的准确理解。在研究破碎粒子对云微物理参量测量的影响前，需要对其它形式的伪粒子进行剔除，这里采用黄敏松等（2017）一文所提方法对其它形式的伪粒子进行剔除。计算中采样体积的计算采用改进的 HP79 方法，具体请参考文献（黄敏松和雷恒池, 2018）。

4.1　对云粒子谱的影响

云粒子谱是云降水粒子群体最基本的微物理属性，用以表示一定体积内不同尺度云粒子数量的多少。云降水粒子谱的演变体现了云与降水的发展变化过程，其计算公式如下：

$$P_i = \frac{N_i}{V_{\text{samp}}\Delta r}, \qquad (2)$$

其中，P_i表示第i个尺度间隔内云粒子的数浓度半径分布函数，N_i为一个采样周期内测得的半径在r_i～$r_i+\Delta r$之间的粒子数目，V_{samp}为采样体积。

为了表征破碎云粒子对云粒子谱参量的影响，这里引入一个新的函数：

$$R_i = \frac{P_i^{\text{NA}}}{P_i^{\text{A}}}, \qquad (3)$$

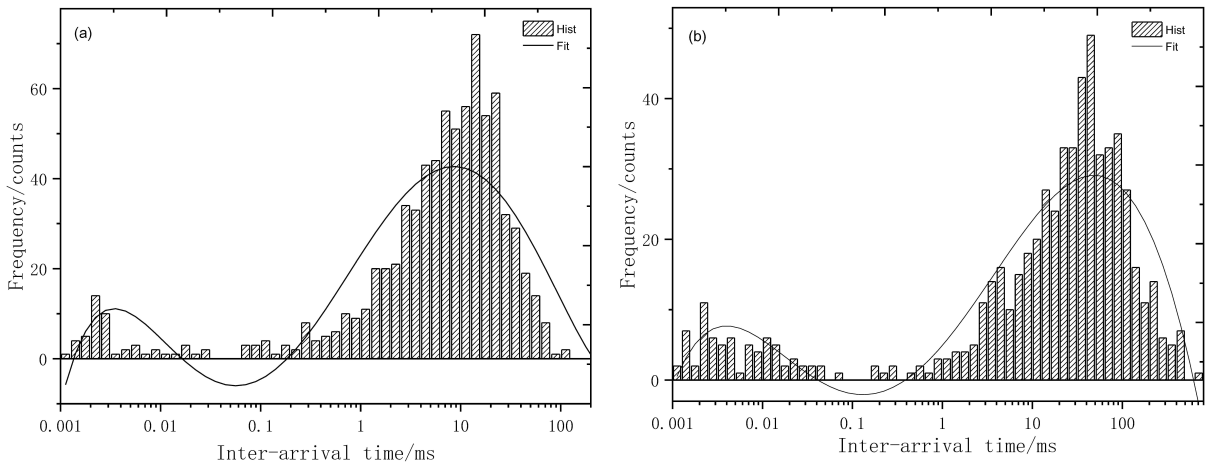

图 3 （a）S1 时段和（b）C1 时段内第一个短周期的到达时间间隔统计和曲线拟合结果

Fig. 3 Inter-arrival time statistics and curve fit result of the first short period in (a) S1 and (b) C1

其中，R_i表示第i个尺度间隔内破碎云粒子剔除前后数浓度半径分布比值函数，P_i^{NA}表示第i个尺度间隔内破碎云粒子剔除前云粒子数浓度半径分布函数，P_i^{A}表示第i个尺度间隔内利用本文所提算法对破碎云粒子进行识别剔除后的云粒子数浓度半径分布函数，因此P_i^{A}表示的是一个相对真实的云粒子谱值，通过公式（3）可以比较直接地定量获取云粒子破碎对云粒子谱参量的影响。

此外，为了获取更具有普遍性的影响值，对多个时段的粒子谱参量的影响值进行平均，获取破碎云粒子剔除前后数浓度半径分布比值函数的平均值，具体计算公式如下：

$$R_{i\mathrm{m}}=\frac{\sum_{j=1}^{N}\frac{P_i^{\mathrm{NA}}}{P_i^{\mathrm{A}}}}{N},\qquad(4)$$

其中，$R_{i\mathrm{m}}$表示多个时段内第i个尺度间隔内破碎云粒子剔除前后数浓度半径分布比值函数的平均值，N表示所选的云区时段数，通过公式（4）获取的云粒子破碎对云粒子谱参量的影响更具有普遍的代表性。

利用公式（2）和公式（3），对所选层云区和对流云区航测时段的资料进行处理，获取相应时段云区内破碎云粒子剔除前后的云粒子谱分布特征和粒子数浓度半径分布函数比值的分布情况，其中层云区的粒子数浓度半径分布函数比值分布情况如图 4a 所示，对流云区的粒子数浓度半径分布比值分布情况如图 4b 所示。

从图 4a 中可看出破碎云粒子对层云区粒子谱的影响在 300 μm 以下粒径段在所选的 5 个时段内均存在，在 500 μm 以下粒径段则主要存在于 S3、S4 和 S5 三个时段，但在 1000 μm 以上，破碎云粒子对 5 个时段的影响又变得明显起来。值得注意的是，对于所选时段 S3，破碎粒子对粒子谱的影响在全粒径段均存在，其中在 100 μm 以下，破碎粒子可使粒子谱值最大增大 10 倍。从图 4b 中可看出破碎粒子对对流云区粒子谱的影响在 500 μm 以下粒径段在所选的 4 个时段内均存在，事实上除了所选时段 C1 外，其它三个时段破碎粒子的影响在全粒径段均存在，与层云区类似，在 1000 μm 以上，破碎云粒子的影响又变得明显起来。此外，所选时段 C4，破碎云粒子对整个粒径段云粒子谱的影响特别严重，其中有三个粒径段的影响值在 10 倍左右。

利用公式（3）获取的破碎云粒子剔除前后对粒子谱分布影响的平均值如图 5 所示，其中黑线表示层云区的平均值，虚线则表示对流云区的平均值，从图 5 中可以看出破碎粒子对粒子谱的影响在层云区和对流云区的全粒径段内均存在，但主要存在于小粒径端和大粒径端；其中在小粒径段 300 μm 以下，其影响均值在 1.5 倍以上，而大粒径端在 1200 μm 以上，其影响均值在 1.4 倍以上；除了个别粒径段，破碎粒子对对流云区粒子谱的影响均大于对层云区粒子谱的影响，就全粒径段相对于对层云区粒子谱的影响平均而言，破碎粒子对对流云区粒子谱的影响要高出 20% 以上。

4.2 对粒子数浓度的影响

粒子数浓度表示的是单位体积内的粒子总数。根据公式（5）进行计算。其中N_{d}为粒子数浓度，

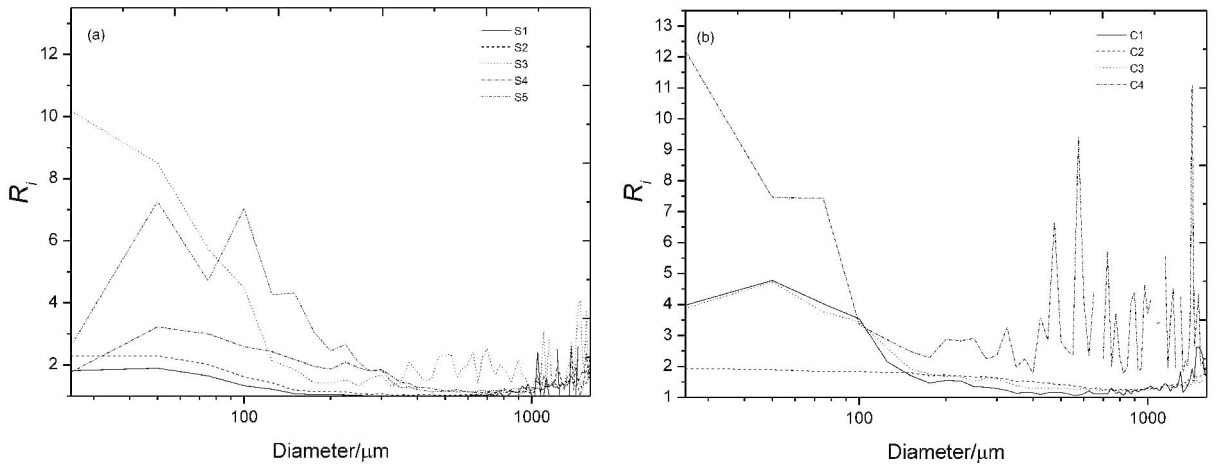

图 4　不同云区时段破碎云粒子剔除前后粒子数浓度半径分布函数比值分布：（a）层云区；（b）对流云区

Fig. 4　Ratio distribution of the cloud particle number concentration with diameter in different cloud types before and after the shattered rejection: (a) Stratus; (b) convective

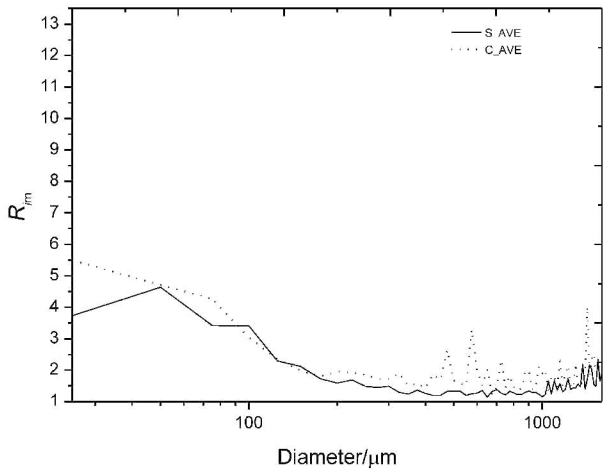

图 5　破碎云粒子剔除前后粒子谱平均比值分布

Fig. 5　Ratio average distribution of the cloud particle spectrum distribution in different cloud types before and after the shattered rejection

N_n为粒子个数，V_{samp}为采样体积，其计算公式下：

$$N_d = N_n / V_{samp}. \quad (5)$$

计算过程中，以 10 s 为一个统计空间，获取一个具有代表性的粒子数浓度值。此外，为了更加直观的展示破碎云粒子对云粒子数浓度的影响，这里参照公式（3），引入一个新的函数：

$$R_d = \frac{N_d^{NA}}{N_d^{A}}, \quad (6)$$

其中，R_d表示破碎云粒子剔除前后的粒子数浓度比值，N_d^{NA}表示破碎粒子剔除前的粒子数浓度值，N_d^{A}表示利用本文所提算法对破碎粒子进行识别和剔除后的粒子数浓度值，该值也是一个相对真实的云粒子数浓度值。

利用公式（5）和公式（6）对所选云区时段的资料进行计算，并对计算后的结果进行统计，这里主要是统计每一个时段所获取的破碎云粒子剔除前后的粒子数浓度比值的最大值、最小值和平均值，对层云区和对流云区的计算结果进行统计后的结果分别如图 6a 和 b 所示。

从图 6a 可看出，就单个时次而言，破碎粒子对层云区粒子数浓度的影响最大值可达 31.32 倍，平均值中最大值则为 7.6 倍。对所选的 5 个层云区时段粒子数浓度影响的最大值和平均值分别进行平均后可知，破碎云粒子对层云区粒子数浓度测量影响的最大值平均是 15.31，而对整个层云区粒子数浓度影响的平均值是 4.56。

从图 6b 可看出，破碎粒子对对流云区粒子数浓度的影响中其最大影响值可达到 79.93 倍，平均值中最大值为 12.13 倍。对所选 4 个对流云云区时段粒子数浓度影响的最大值和平均值分别进行平均后可知，破碎云粒子对对流云云区粒子数浓度测量影响的最大值平均是 35.23，而对整个对流云区粒子数浓度影响的平均值是 8.47。与层云区相比，破碎云粒子对对流云区的粒子数浓度影响更大，其影响程度就平均而言接近 2 倍的关系。

4.3　对冰水含量的影响

冰水含量的计算公式如下：

$$IWC = \frac{1}{L}\sum_j \frac{m_j}{S_j}, \quad (7)$$

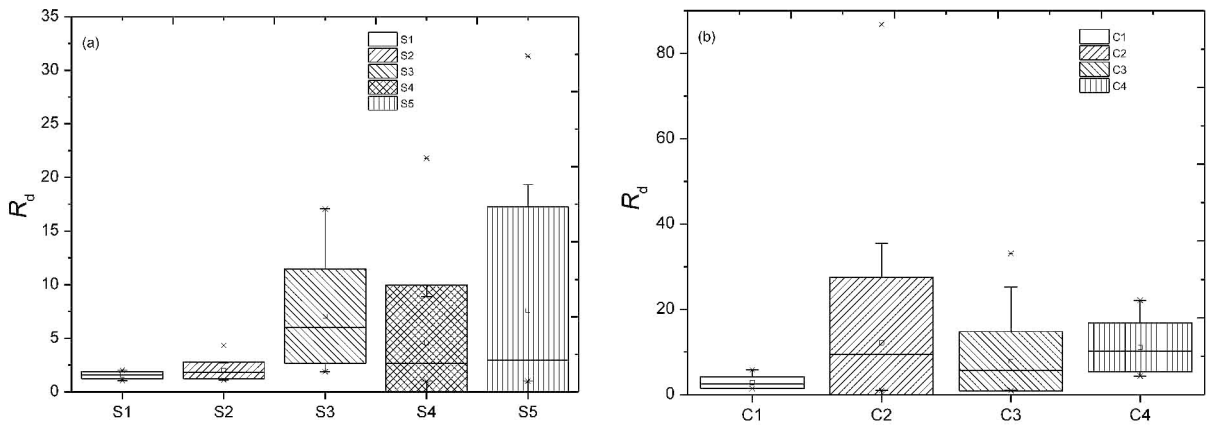

图 6 所选云区时段内破碎粒子剔除前后的粒子数浓度比值（R_d）的统计结果：（a）层云区；（b）对流云区

Fig. 6 Statistics ofthe cloud particle number concentration ratio (R_d) in the selected cloud area before and after the shattered rejection: (a) Stratus; (b) convective

其中，L表示探测飞行的距离，S_j则表示与粒径相关的采样面积，m_j表示与粒径相对应的冰粒子质量，可利用质量—维数的关系方法进行计算（Brown and Francis, 1995），公式如下：

$$m_j = aD_j^b, \tag{8}$$

其中，m_j是粒子质量，单位是 g，D_j是粒子粒径，单位是 μm，a=7.38×10^{-11}，b=1.9。

同样，为了更好地衡量破碎云粒子对冰水含量的影响，依然以 10 s 为间隔获取一个具有统计意义的冰水含量值，并引入一个新的函数：

$$R_{\mathrm{IWC}} = \frac{\mathrm{IWC^{NA}}}{\mathrm{IWC^{A}}}, \tag{9}$$

其中，R_{IWC}表示破碎云粒子剔除前后的冰水含量比值，IWC$^{\mathrm{NA}}$表示破碎粒子剔除前的冰水含量值，IWC$^{\mathrm{A}}$表示应用本文所提算法对破碎粒子进行识别和剔除后的冰水含量值，该值也是一个相对真实的云冰水含量值。

利用公式（7）、（8）和（9、）对所选时段的航测资料进行计算，并对计算结果进行统计，这里依然只统计每一个时段所获取的破碎云粒子剔除前后的冰水含量比值的最大值、最小值和平均值，不同云区的统计结果如图 7a 和 b 所示。

从图 7a 可看出，破碎云粒子对层云区冰水含量测量的影响均不大，就单个时段而言，最大值仅为 2.33 倍，平均值中的最大值仅为 1.76 倍。对所选的 5 个层云区时段云冰水含量影响的最大值和平均值分别进行平均后可知，破碎云粒子对层云区云冰水含量测量影响的最大值平均是 1.9，而对整个层云区云冰水含量测量影响的平均值是 1.34。

从图 7b 可看出，破碎粒子对对流云区冰水含量测量的影响中其最大值为 3.51 倍，平均值中最大值为 2.62 倍。对所选 4 个对流云云区时段云冰水含量影响的最大值和平均值分别进行平均后可知，破碎云粒子对对流云区云冰水含量测量影响的最大值平均是 2.76，而对整个对流云区云冰水含量测量影响的平均值是 1.74。与层云区相比，破碎云粒子对对流云区的云冰水含量测量影响稍微大点，其影响程度就平均值而言大约增加了 30%。

5 总结和讨论

本文通过构造一个新的云粒子破碎识别方法，研究了云粒子破碎对机载云粒子成像仪（CIP）在积层混合云系中测量的影响，尤其研究了该影响在层云区和对流云区域的异同，得到如下结论：

（1）云粒子破碎可使云粒子的到达时间间隔分布具有明显的双模态特征。该双模态特征可由多项式进行拟合，通过对时间长度和粒子数进行限定，可以获取云中不同区域云粒子破碎的识别阈值。由于实际测量的云环境是不断变化的，因此该阈值是时变的。

（2）破碎粒子对粒子谱影响在小粒径端（500 μm 以下）和大粒径（1000 μm 以上）两端都存在，其中在层云区，破碎粒子在小粒径端的主要影响位于 300 μm 以下，而在对流云区，主要影响的小粒径段位于 500 μm 以下。就具体时段粒径而言，破碎粒子对粒子谱的影响可在 10 倍以上。就整体平均而言，破碎粒子对对流云区粒子谱的影响要比对

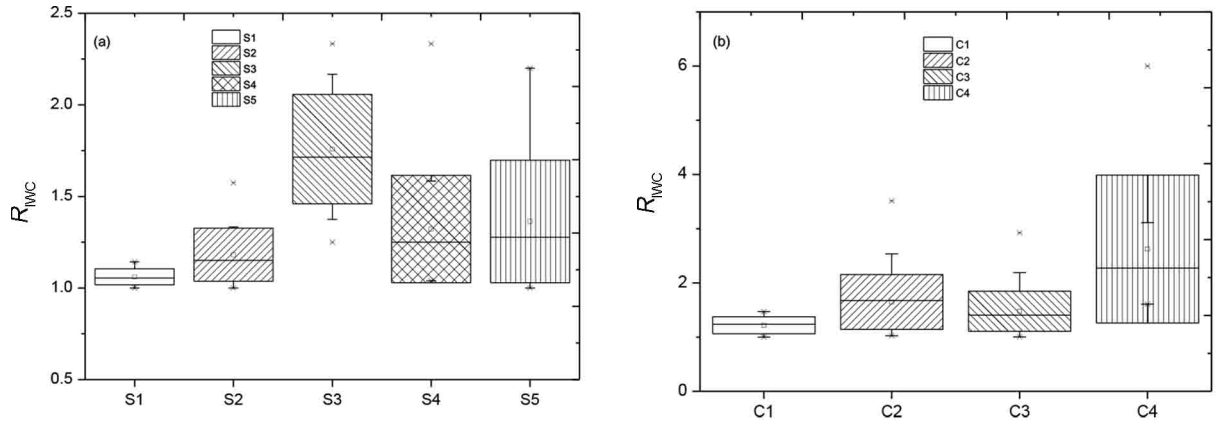

图 7　所选云区时段内破碎粒子剔除前后的冰水含量比值（R_{IWC}）的统计结果：（a）层云区；（b）对流云区

Fig. 7　Statistics of the ice water content ratio(R_{IWC}) in the selected area before and after the shattered rejection: (a) Stratus; (b) convective

层云区的影响高出 20% 以上。

（3）在粒子数浓度测量上，破碎粒子对整个层云区粒子数浓度影响的平均值是 4.56 倍，对整个对流云区粒子数浓度影响的平均值是 8.47。与层云区相比，破碎云粒子对对流云区的粒子数浓度影响更大，其影响程度就平均而言接近 2 倍的关系。

（4）在冰水含量测量上，破碎粒子对整个层云区云冰水含量测量影响的平均值是 1.34 倍，对整个对流云区云冰水含量测量影响的平均值是 1.74 倍。与层云区相比，破碎云粒子对对流云区的云冰水含量测量影响稍微大点，其影响程度就平均值而言大约增加了 30%。

（5）云粒子破碎对不同云区的同一个云微物理参量测量的影响不同，在对流云区的影响均大于在层云区的影响；在同一个云区，其对不同云微物理参量的测量影响也不同，其对粒子数浓度的影响要大于其对冰水含量的影响。考虑到云粒子破碎对测量的影响，在运用 CIP 仪器所测云微物理数据进行云微物理研究前建议参考本文所提方法对破碎粒子进行剔除，尤其在研究对流云区的冰晶繁生现象时。

参考文献（References）

Brown P R A, Francis P N. 1995. Improved measurements of the ice water content in cirrus using a total-water probe [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 12: 410−414. doi:10.1175/1520-0426(1995)0122.0.CO;2

Field P R, Wood R, Brown P R A, et al. 2003. Ice particle interarrival times measured with a fast FSSP [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 20(2): 249−261. doi:10.1175/1520-0426(2003)020<0249:IPITMW>2.0.CO;2

Field P R, Heymsfield A J, Bansemer A. 2006. Shattering and particle interarrival times measured by optical array probes in ice cloud [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 23(10): 1357−1371. doi:10.1175/JTECH1922.1

Hallett J, Mossop S C. 1974. Production of secondary ice particles during the riming process [J]. Nature, 249(5452): 26−28. doi:10.1038/249026a0

Hobbs P V, Locatelli J D. 1978. Rainbands, precipitation cores and generating cells in a cyclonic storm [J]. J. Atmos. Sci., 35(2): 230−241. doi:10.1175/1520-0469(1978)035<0230:RPCAGC>2.0.CO;2

Hobbs P V, Rangno A L. 1990. Rapid development of high ice particle concentrations in small polar maritime cumuliform clouds [J]. J. Atmos. Sci., 47(22): 2710−2722. doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2710:RDOHIP>2.0.CO;2

洪延超. 1996. 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, 54(5): 544−557.　Hong Y C. 1996. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed clouds. Part (I)—The model and parameterization of microphysical processes [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 54(5): 544−557. doi:10.11676/qxxb1996.057

黄敏松, 雷恒池. 2018. 部分状粒子处理方法及其对云微物理参数测量的影响 [J]. 物理学报, 67(24): 249202.　Huang M S, Lei H C. 2018. Processing method for the partial particles and its influence on the cloud microphysical parameters measured by the airborne cloud and precipitation image probe [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 67(24): 249202. doi:10.7498/aps.67.20181412

黄敏松, 雷恒池, 金玲. 2017. 机载云降水粒子成像仪所测数据中伪粒子的识别 [J]. 大气科学, 41(5): 1113−1124.　Huang M S, Lei H C, Jin L. 2017. Pseudo Particle identification in the image data from the airborne cloud and precipitation particle image probe [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(5): 1113−1124. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16259

黄美元, 洪延超, 徐华英, 等. 1987. 层状云对积云发展和降水的影响——一种云与云之间影响的数值模拟 [J]. 气象学报, 45(1): 72−77.　Huang M Y, Hong Y C, Xu H Y, et al. 1987. The effects of the

existence of stratiform cloud on the development of cumulus cloud and its precipitation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 45(1): 72−77. doi:10.11676/qxxb1987.009

黄敏松, 雷恒池, 陈家田, 等. 2016. 机载光阵探头探测期间云粒子的破碎 [J]. 大气科学, 40(3): 647−656. Huang M S, Lei H C, Chen J T, et al. 2016. Cloud particle shattering during sampling by airborne optical array probes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(3): 647−656. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15106

Jackson R C, McFarquhar G M, Stith J, et al. 2014. An assessment of the impact of antishattering tips and artifact removal techniques on cloud ice size distributions measured by the 2D cloud probe [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(12): 2567−2590. doi:10.1175/JTECH-D-13-00239.1

Jackson R C, McFarquhar G M. 2014. An assessment of the Impact of antishattering tips and artifact removal techniques on bulk cloud ice microphysical and optical properties measured by the 2D cloud probe [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(10): 2131−2144. doi:10.1175/JTECH-D-14-00018.1

Jiang F Y, Zhang Y, Bu L B, et al. 2019. Calibration and measurement analysis of a cloud particle detection system based on polarization detection [J]. Appl. Opt., 58(36): 9777−9785. doi:10.1364/AO.58.009777

Korolev A, Isaac G A. 2005. Shattering during sampling by OAPs and HVPS. Part I: Snow particles [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22(5): 528−542. doi:10.1175/JTECH1720.1

Korolev A, Emery E, Creelman K. 2013a. Modification and tests of particle probe tips to mitigate effects of ice shattering [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30(4): 690−708. doi:10.1175/JTECH-D-12-00142.1

Korolev A V, Emery E F, Strapp J W., et al 2011. Small ice particles in tropospheric clouds: Fact or artifact? Airborne icing instrumentation evaluation experiment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92(8): 967−973. doi:10.1175/2010BAMS3141.1

Korolev A V, Emery E F, Strapp J W., et al 2013b. Quantification of the effects of shattering on airborne ice particle measurements [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30(11): 2527−2553. doi:10.1175/JTECH-D-13-00115.1

Morrison H, McCoy R B, Klein S A, et al. 2009. Intercomparison of model simulations of mixed-phase clouds observed during the ARM mixed-phase arctic cloud experiment. II: Multilayer cloud [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135(641): 1003−1019. doi:10.1002/qj.415

秦彦硕, 蔡淼, 刘世玺, 等. 2017. 华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微物理特征与催化响应分析 [J]. 气象学报, 75(5): 835−849. Qin Y S, Cai M, Liu S X, et al. 2017. A study on macro and micro physical structures of convective−stratiform mixed clouds associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75(5): 835−849. doi:10.11676/qxxb2017.049

Rangno A L, Hobbs P V. 2005. Microstructures and precipitation development in cumulus and small cumulonimbus clouds over the warm pool of the tropical Pacific Ocean [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131(606): 639−673. doi:10.1256/qj.04.13

Yang J F, Lei H C, Hou T J. 2017. Observational evidence of high ice concentration in a shallow convective cloud embedded in stratiform cloud over North China [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(4): 509−520. doi:10.1007/s00376-016-6079-x

张佃国, 姚展予, 龚佃利, 等. 2011. 环北京地区积层混合云微物理结构飞机联合探测研究 [J]. 大气科学学报, 34(1): 109−121. Zhang D G, Yao Z Y, Gong D L, et al. 2011. Microphysical structures of stratocumulus mixed cloud detected by aircraft around Beijing area [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 34(1): 109−121. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.01.014

Zhao Z, Lei H C. 2014a. Observed microphysical structure of nimbostratus in northeast cold vortex over China [J]. Atmos. Res., 142: 91−99. doi:10.1016/j.atmosres.2013.09.008

Zhao Z, Lei H C. 2014b. Aircraft observations of liquid and ice in midlatitude mixed-phase clouds [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(3): 604−610. doi:10.1007/s00376-013-3083-2

朱士超, 郭学良. 2014. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究 [J]. 气象学报, 72(2): 366−389. Zhu S C, Guo X L. 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72(2): 366−389. doi:10.11676/qxxb2014.013