

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 Minsong, Lei Hengchi, Jin Ling. 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.

机载云降水粒子成像仪所测数据中伪粒子的识别

黄敏松¹ 雷恒池^{1,2} 金玲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 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 机载云粒子成像仪 (Cloud Imaging Probe, 简称 CIP) 和降水粒子成像仪 (Precipitation Imaging Probe 简称 PIP) 所测数据中伪粒子的存在会直接导致仪器所测数据质量下降。利用山西 Y-12 探测飞机在太原地区的三次航测资料对飞机采样期间伪粒子图像的特点及其成因进行了分析和归类, 并在此基础上提出了综合利用到达时间间隔阈值和图像处理识别技术的伪粒子识别方法。利用所提的方法对航测的粒子图像资料进行处理、统计和分析, 统计结果表明, 在一次测量过程中伪粒子的出现概率最高可达 45.2%, 其平均出现概率分别是 36.01% (CIP) 和 8.64% (PIP); 在所有伪粒子成分中, 破碎形成的伪粒子的出现概率是最高的, 它可以占到伪粒子总数的 95% 以上; 其次是条纹状粒子和并存粒子, 相对来说, 空白粒子和线状粒子出现的概率是比较低的。研究还发现, 机载平台的飞行状态对伪粒子各成分的出现概率也会造成影响。利用所提方法对仪器测量的粒子谱、粒子数浓度和冰水含量值进行订正, 订正结果表明伪粒子对仪器量程内的粒子谱、粒子数浓度和冰水含量值均有影响, 其中在云粒子谱影响上, 伪粒子对粒子谱两端的影响较大, 其中对小云粒子谱的影响主要是在 400 μm 以下, 对大云粒子谱的影响主要是在 1000 μm (CIP) 和 2000 μm (PIP) 以上。所提方法和阈值对于以 Y-12 飞机为机载探测平台, 以 CIP 和 PIP 为探测仪器所获取的其它航次云微物理图像资料处理也是有一定的参考价值。

关键词 机载云降水粒子成像仪 伪粒子 破碎粒子

文章编号 1006-9895(2017)05-1113-12

中图分类号 P413

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16259

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

HUANG Minsong^{1,2}, LEI Hengchi¹, and JIN Ling¹

¹ Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Pseudo particles in the image data from the airborne Cloud Imaging Probe (CIP) and Precipitation Imaging Probe (PIP) measurements can degrade the quality of the measurement data. Utilizing three flights data in Taiyuan area from Shanxi Y-12 research plane, the causes and characteristics of the pseudo particles were analyzed and classified. A pseudo particle identification method was proposed based on the results, which includes the inter-arrival time threshold

收稿日期 2016-11-08; 网络预出版日期 2017-03-20

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 国家重大科研仪器设备研制专项 41327803, 国家自然科学基金项目 41405128

Funded by National Major Program for Scientific Research Instrument Development of China (Grant 41327803), National Natural Science Foundation of China (Grant 41405128)

and the image processing identification technique. Using the algorithm proposed in this study, the image data were processed and analyzed statistically. It was found that the maximum occurrence probability of artifacts in each research flight could reach 45.2% with an average occurrence probability of 36.01% (CIP) and 8.64% (PIP). Among the artifacts, the occurrence probability of the shattered fragments was the highest, which accounted for more than 95% of the total number of pseudo particles; stripe shaped particles and the coexisting particles showed the second highest occurrence probability. Relatively speaking, the occurrence probability of blank particles and line shaped particles appeared to be relatively low. It was also found that the occurrence probability of each individual component of the pseudo particles could be influenced by the flight state of the airborne platform. By using the proposed method, the particle spectrum, particle concentration and ice water content from the probes were corrected, and results show that the artifacts could influence the particle spectrum, particle concentration and ice water content within the measuring range of the probe. Specifically, the effect on the particle spectrum lied on the portion less than 400 μm and greater than 1000 μm (CIP) and 2000 μm (PIP). The method and threshold proposed here provide some references for other flights data from CIP and PIP aboard the Y-12 research plane.

Keywords Airborne cloud and precipitation imaging probe, Pseudo particle, Shattered particle

1 引言

飞机穿云观测是现代云微物理研究的主要探测手段, 飞机观测数据不仅可用于云降水物理与人工影响天气研究, 还可用于卫星雷达等遥感结果的验证。国内的飞机观测主要是利用气象部门人工影响天气的作业飞机搭载观测仪器进行云微物理测量, 一般是 Y-12 飞机搭载美国粒子测量技术公司 (Droplet Measurement Technology, 简称 DMT) 所制造生产的测量仪器系统, 其中含有云粒子成像仪 (Cloud Imaging Probe, 简称 CIP) 和降水粒子成像仪 (Precipitation Imaging Probe, 简称 PIP)。由于成像仪器不仅能记录下粒子的一维统计信息, 还能保存下粒子图像信息, 因此每次飞机观测均会包含有此类仪器。从成像仪器所获取的粒子图像来看, 仪器所获取的粒子图像中包含有很多以多种伪迹形式存在的伪粒子。伪粒子的存在, 导致从粒子图像获取的云微物理参数发生偏差, 这不仅不利于云降水物理与人工影响天气研究, 也将误导遥感测量结果。因此, 很有必要对云降水粒子图像中的伪迹进行识别和剔除。

在云降水粒子图像中伪粒子的识别研究方面, 1980 年代, Baumgardner and Dye (1983)、Heymsfield and Baumgardner (1985) 等曾组织过两次研讨会, 会上达成的共识之一就是针对机载测量条件下, 云粒子与探头臂发生机械碰撞而生成的破碎伪粒子可采用到达时间间隔和轴比的阈值方法予以识别剔除。而在一份更早的报告中, Cooper (1977) 给出了一个用于二维光阵探头探测数据中去除破碎粒子的方法, 他认为如果粒子图像的到达时间间隔

所对应的空间距离小于 2.5 cm, 则第 2 个粒子应该被视为粒子碎片予以去除。Korolev and Isaac (2005) 对粒子破碎效应进行研究后指出, 粒子破碎程度与粒子类型、大小、粒子密度、探头入口设计以及飞行空速等有关。云粒子破碎可以影响从二维探头测量结果计算得到的云粒子浓度、含水量、雷达反射率等。Field et al. (2006) 分析了光电阵列探测仪所测粒子到达时间间隔的双模态结构, 认为长时间模态代表着真实云结构而短时间模态则代表着破碎的冰粒子, 对四次航测资料中的三个航次资料处理分析, 他采用 2×10^{-4} s 作为粒子破碎的判断阈值, 剩下的一个航次资料则采用 1×10^{-5} s 作为粒子破碎的判断阈值。为了减少破碎伪粒子的出现概率, Korolev et al. (2013a) 对探头结构进行了改进并利用风洞验证了改进探头的有效性; 他们还将标准结构的探头和改进结构的探头进行飞行探测实验对比 (Korolev et al. 2011, 2013b), 结合 Field et al. (2006) 提出的破碎粒子滤除算法对粒子破碎的成因及其影响进行初步的量化分析。黄敏松等 (2016) 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 Y-12 飞机为机载平台的破碎粒子识别阈值。由此可见, 现有的伪粒子识别研究主要关注于因破碎所产生的破碎粒子, 对其它形式的伪粒子进行识别的研究较少, 而其它形式的伪粒子对测量结果也具有不可忽略的影响。此外, 基于到达时间间隔的破碎粒子识别算法仅能对一个粒子破碎事件中至少有两个碎片粒子图像帧被记录下来有效, 而当一个粒子破碎事件仅有一个碎片被记录下来或者整个破碎事件中进入仪器采样区中的碎片被仪器以一个粒子图像帧记录下来时, 到达时间间隔

算法是无效的。因此,很有必要对到达时间间隔算法进行完善。由于伪迹粒子的产生不仅和仪器有关,还和机载平台以及所测的大气环境因素相关,因此有必要对国内飞机观测的云粒子图像资料进行分析研究,以提出合适的伪粒子识别方法。

本文首先介绍了机载云降水粒子成像仪的测量原理以及粒子图像帧的概念,然后在分析伪粒子的成因和类别的基础上,提出了联合利用到达时间间隔阈值与图像处理识别技术的伪粒子识别方法,并将此方法应用于伪粒子对测量结果影响的研究。

2 机载云降水粒子成像仪

现在国内的探测飞机(主要是 Y-12)上面所搭载的机载云降水粒子成像仪,主要是由美国粒子测量技术公司(DMT)所制造的仪器 CIP 和 PIP。这两个成像仪器均属于成像阵列探测仪,具有相同的工作原理。当粒子经过由一准直、光强分布均匀的激光光束所照明的采样空间时,其影子就会投射到一个线性光电二极管阵列上面。如果光电二极管所接收到的背景照明激光光强因粒子遮挡被削弱超过 50%,则认为该光电二极管被遮挡了。光电二极管的状态由仪器的控制电路以与飞行速度成正比的时钟频率进行扫描而获取,因此每扫描一次,就会生成粒子图像的一条线(slice),将一个粒子图像的多条线合并一块,最终会形成一幅二进制的粒子影像,其中 1 表示未受遮挡的像素,0 表示遮挡的像素。一般情况下,能被仪器记录下来的粒子须具有两条线以上的宽度,因为仪器记录下粒子影像时会记录下粒子进入仪器采样区的时刻值,称为粒子的到达时刻,而粒子到达时刻将占用粒子影像第一条线的存储空间,因此,粒子沿着飞机飞行方向的大小必须大于两条线以上的宽度,即仪器分辨率的两倍以上,仪器才能记录下粒子图像。仪器记录下的单粒子图像称为图像帧,图像帧的大小是个矩阵 $M \times N$,其中 M 表示光电二极管阵列的单元数, N 表示的是沿飞行方向仪器所记录下的粒子线数目,仪器规定,一旦光电阵列所有二极管单元均未被遮挡或者所有二极管所接收到的光强大于背景光强 50%以上,即出现一条空白线时仪器停止扫描采集,从而形成一个粒子图像帧。为了减小伪迹的影响,仪器还规定,粒子线数大小不超过 100,当超过 100 时,仪器将会停止采集,直到有下一个粒子出现,因此一个粒子图像帧的最大宽度不超过 100。沿着光电二极管阵列(Y 方向)的仪

器像素精度由仪器的光学放大倍数所决定,而与光电二极管阵列相垂直方向的像素精度(例如,与气流向平行,X 方向)则由时钟频率和空气速度所决定。对于 CIP 和 PIP 而言,经过适当的频率设置后,X 和 Y 方向的像素精度是一致的,并分别为 25 μm 和 100 μm 。CIP 和 PIP 的线性光电二极管阵列均含有 64 个光电二极管,其测量范围分别是 25~1550 μm (CIP) 和 100~6200 μm (PIP)。两仪器的采样面积位于仪器两延伸臂之间分别为 155 mm^2 和 1550 mm^2 。两臂距离分别是 100 mm (CIP) 和 250 mm (PIP)。

文中数据来自山西省人工降雨防雹办公室的探测飞机 Y-12 在太原地区的三次航测[20080705(即 2008 年 7 月 5 日的探测资料,下同)、20090619 和 20100420]结果。利用自主开发的云降水粒子图像数据处理软件对文中数据进行分析,该软件可获取 CIP 和 PIP 探头图像数据中的粒子大小、粒子的到达时间、粒径分布等重要的粒子信息。

3 云粒子图像中的伪粒子

从航测的粒子图像资料来看,机载云降水粒子成像仪所测粒子图像中含有数目相当多的伪粒子图像,这其中除了有因破碎而生成的伪粒子外,还有因其它原因,比如电磁噪声形成的伪粒子(Baker et al., 2009)。这里我们根据伪粒子的成因以及伪粒子图像的特点,将机载光阵探头所测云粒子图像中的伪粒子分为碎片粒子、并存粒子、线状粒子、条纹状粒子和空白粒子等,如图 1 所示。

破碎的碎片伪粒子主要是在飞行测量过程中,云粒子与成像探头的探测臂等之间发生碰撞,或者与探测臂等周围产生的空气动力,如湍流、切变力等相互作用而破碎产生的粒子碎片(KorolevandIsaac, 2005),但我们这里还特指这些碎片粒子由仪器所记录成的粒子图像帧必须在 2 帧以上,如图 1a 所示为破碎成 4 个粒子图像帧的破碎粒子,由白色线间隔开。并存粒子是指一个粒子图像帧内存在有 2 个或者 2 个以上的孤立粒子,如图 1b、c 所示,并存粒子出现的原因可能是由于云中粒子数浓度较大,在仪器的采样空间中同时出现 2 个或者 2 个以上自然云粒子;也可能是由于粒子破碎而形成的多个粒子碎片同时出现于采样空间,或者是粒子破碎形成的碎片粒子与自然云粒子同时出现于采样空间。这些碎片粒子或者自然云粒子因同时出现在采样空间或因排列紧密超过仪器的分辨能力而被仪

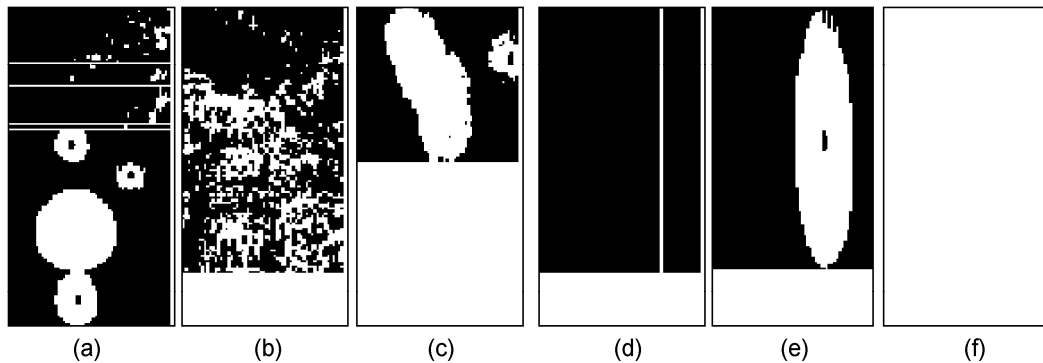


图1 机载探测过程中的伪粒子图像: (a) 破碎粒子, 横向白色间隔线上方, 4个连续的破碎粒子图像帧; (b) 破碎的并存粒子, 单图像帧; (c) 自然的并存粒子, 单图像帧; (d) 线状粒子, 单图像帧; (e) 条纹状粒子, 单图像帧; (f) 空白粒子, 单图像帧

Fig. 1 Examples of pseudo particle image during probe measurement: (a) Shattered particles in four continuous image frames above the white line; (b) shattered coexisting particles in a single image frame; (c) natural coexisting particles in a single image frame; (d) line shape particles in a single image frame; (e) stripe shape particles in a single image frame; (f) empty particles in a single image frame

器记录为单个粒子的粒子图像称为并存粒子。对于由自然云粒子组成的并存粒子, 我们称之为自然的并存粒子; 而对于由破碎粒子或者破碎粒子与自然粒子一起组成的并存粒子, 我们称之为破碎的并存粒子。线状粒子图像的特点是在某个方向上有间断而另一方向上会有条状挡光, 呈规则的条带状或者仅是一条直线, 沿飞行方向长度可达到 99 条线。线状粒子出现的原因主要是由电信号的干扰或者成像仪的探测窗口因结冰结霜或者成像仪测量时光机电配合不当所生成的图像, 如图 1d 所示。条纹状粒子的图像特点是图像帧内的粒子形状呈拉长的条带状, 其出现的原因是由于粒子图像的采样速度和飞机的空速不匹配产生的, 最常见的情况是飞机爬升阶段对液滴的采集或者冰粒子在仪器探头尖端或者采样窗口融化后为仪器采集而产生的, 如图 1e 所示。空白粒子是指粒子图像帧内没有任何粒子影像, 其出现的原因可能是因为粒子本身尺寸比较小, 可能仅有一条线的宽度, 当它经过仪器采样区时, 仪器仅记录下粒子的到达信息而没记录下粒子影像, 如图 1f 所示。

4 伪粒子的识别

4.1 碎片粒子识别

CIP 和 PIP 在测量记录云粒子图像期间会把云粒子进入仪器采样空间的时间也给记录下来, 称为云粒子到达时间。相邻两个云粒子的到达时间差称为到达时间间隔。因此云粒子破碎时, 如果碎片是

一个一个依次经过仪器采样空间且能由仪器所分辨时, 则会形成一连串连续的粒子图像帧, 每个粒子碎片形成一个图像帧, 且均有一个到达时间; 如果某些破碎粒子因其分布比较密集而无法为仪器所分辨时则一起被仪器以一个粒子形式记录下来, 形成一个图像帧, 此时该图像帧内会包括几个甚至几十上百个破碎粒子, 这些粒子共用第一个碎片粒子的到达时间。

Korolevand Isaac (2005) 的分析表明粒子破碎形成伪粒子的主要原因有二: “静止”的云粒子与探头的探测臂等之间发生碰撞, 或者与探测臂等周围产生空气动力, 如湍流、切变力等相互作用。粒子破碎程度不同, 有的完全破碎, 有的部分破碎, 有的破碎成数量多、尺度小的粒子帧, 有的破碎成数量少但尺度大的粒子帧。对于形成连续的破碎粒子图像帧情形, 可以用黄敏松等 (2016) 所提出的到达时间间隔阈值方法进行识别, 其中适合于探头 CIP 的阈值是 2×10^{-5} s, 而探头 PIP 的阈值是 1×10^{-4} s; 但对于粒子破碎后仅形成单个破碎的粒子图像帧情形, 由于仅有一个到达时间, 这时到达时间间隔方法是无法识别出该情形的破碎粒子, 由于破碎的单个粒子图像帧属于并存粒子的情形, 即破碎的并存粒子, 因此该部分破碎粒子的识别方法归并于并存粒子识别中进行阐述。

4.2 并存粒子识别

基于机载云降水粒子成像仪的测量原理, 一般情形下一个粒子图像帧内仅存在一个粒子图像, 但

无关；(2) 体积 V 的深度 d 等效于平均粒径；(3) L 等效为仪器探测臂之间的距离；(4) $W = k\Delta x$ ，其中 k 是被粒子遮挡的光电二极管单元数， Δx 是仪器的像素精度；(5) 粒子浓度按照探测时间段内最大值选择。按照上述假设获取的并存粒子存在的概率是个上限值，因为平均数浓度要低于最大值，实际的 L 、 W 值也更小。

利用公式 (1)，对单一图像帧内出现的粒子数概率进行统计，其中按照探测过程中粒子浓度分别为 $3/L$ 和 $10/L$ 的两种情况进行计算，结果如表 1 和表 2 所示。从表 1 中可以看出，在粒子数浓度最大为 $3/L$ 情况下，CIP 仪器探测过程中同时出现 2 个以上的粒子数概率不超过 0.05%，而当粒子数浓度增大到 $10/L$ 情况下，CIP 仪器探测出现 2 个以上粒子数概率不超过 0.53%，出现 3 个以上粒子数概率不超过 0.02%。从表 2 中可以看出，PIP 仪器探测过程中，当粒子数浓度最大为 $3/L$ 时，采样区内同时出现 2 个以上概率不超过 3.83%，同时出现 4 个以上概率不超过 0.03%；当粒子数浓度增大到 $10/L$ 时，同时出现 4 个以上概率不超过 1.95%，5 个以上概率不超过 0.42%。由此可见，在自然云探测过程当中，在仪器采样区内同时出现多个自然云粒子的概率是很低的。

4.2.3 并存粒子识别阈值

从上节可知，对于 CIP 和 PIP 而言，仪器测量过程中多个自然云粒子同时出现在仪器采样空间内概率是非常低的。而且从所探测的粒子图像看，绝大部分的粒子图像帧内仅是单个粒子存在，多个自然云粒子共存的情形还是比较少的。但是这不能等同于绝大部分的并存粒子为破碎的并存粒子，实际上，在某些情况下，由于仪器自身的原因或者粒子存在的形式也可能导致多孤立粒子现象存在，并对仪器的测量结果造成影响，如图 3 所示。从图中可以看出多个孤立粒子出现的原因除了云中粒子数浓度过高以及粒子破碎导致的多孤立粒子出现外，还有可能是枝状粒子的枝状部分突出到仪器采样区内，而枝状间的连接部分位于仪器采样区外，又或者是光学衍射的原因，比如粒子位于景深外导致的单图像帧内多孤立粒子数出现。此外，激光光强的非均匀性及其能量波动、图像的量化、低的灰度精度以及仪器自身有限的电子响应时间等都能引起图像记录过程中在一个图像帧内形成多簇的孤立像素集，即多个孤立粒子 (Korolev and Isaac, 2005)。因

此并存粒子的识别需要考虑到因仪器工作原因导致的多孤立粒子情形，避免误判。由于多自然云粒子共存的概率较低，因此并存粒子的识别可仅考虑破碎并存粒子情形。

表 1 CIP 所测图像帧内出现孤立粒子数的概率统计

Table 1 Probability statistics for the multi-isolated particles number in a single image frame from CIP (Cloud Imaging Probe)

M	$P(n=3/L)$	$P(n=10/L)$
0	0.9680	0.8972
1	0.0315	0.0973
2	0.0005	0.0053
3	...	0.0002

表 2 PIP 所测图像帧内出现孤立粒子数的概率统计

Table 1 Probability statistics for the number of multi-isolated particles in a single image frame from PIP (Precipitation Imaging Probe)

M	$P(n=3/L)$	$P(n=10/L)$
0	0.7222	0.3379
1	0.2351	0.3666
2	0.0383	0.1989
3	0.0041	0.0719
4	0.0003	0.0195
5	...	0.0042

实际上，粒子破碎时所有碎片集中在一个图像帧内时其碎片数是相当高的，这一点可以从图 1b 中得到印证，图 3a、b 中最右侧的图像帧均为粒子破碎形成的，其破碎形成的粒子数均在十几甚至几十个破碎的碎片，这和图中左侧因自然云粒子并存或者是光学衍射以及枝状粒子的连接处位于采样区之外等形成的多孤立粒子数是有显著的区别。因此孤立粒子数可以作为破碎并存粒子识别的一个指标。

利用图像识别技术对单图像帧内的孤立粒子数进行识别统计，然后再对识别出来的多孤立粒子数图像帧进行人眼的识别，以区分出是破碎导致的多孤立粒子还是因仪器测量的原因导致的多孤立粒子，然后再统计出因粒子破碎形成的图像帧数以及碎片数分布范围。所用数据来自航次 20080705 的 09:40:11~09:47:16 (北京时，下同)。该航次时间段内 CIP 测量的粒子图像帧内的并存粒子帧数为 24 帧，所含孤立粒子数范围在 2~77；同样，本航次时段内 PIP 测量的粒子图像帧内并存粒子帧数是 21 帧，所含孤立粒子数范围是 4~79。根据尽量减少误判与尽可能多地识别出破碎形成的伪粒子碎

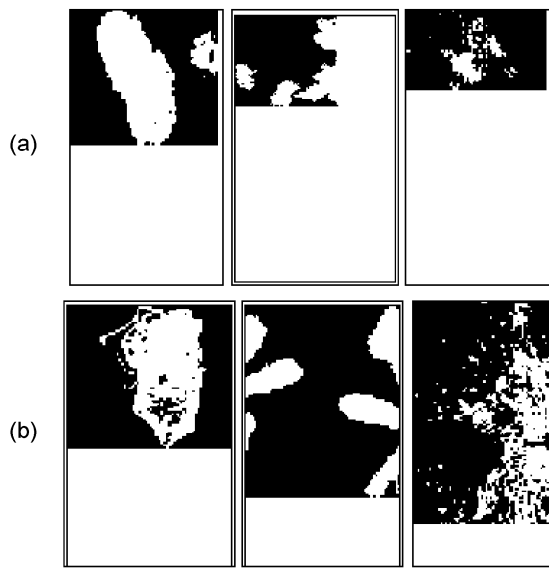


图3 机载云降水粒子成像仪测量过程中的多孤立粒子图像帧：(a) PIP 测量的图像；(b) CIP 测量的图像

Fig. 3 Examples of image frames of multi-isolated particles during the airborne cloud and precipitation imaging probe measurement: (a) Image frames from PIP (Precipitation Imaging Probe); (b) image frames from CIP (Cloud Imaging Probe)

片原则，最终选取 12 和 8 分别作为 CIP 与 PIP 仪器测量过程中因粒子破碎形成的单图像帧内多孤立粒子数的识别阈值。这两个阈值对 20080705 航次数据的正确识别率均在 70%以上。

4.3 线状粒子识别

线状粒子主要是由电信号的干扰或者窗口镜结霜结雾导致的图像，此类图像的特点是在某个方向上有间断而另一方向上会有条状挡光，呈规则的条带状或者仅是一条直线，沿飞行方向长度达到 99 条线，线状粒子的粒子图像如图 1d 所示。考虑到粒子图像特点，对于仅是一条直线类型的，采用线条数外加粒径比的判据，即沿飞行方向的粒径和沿光阵方向的粒径之间的比值大于 30 为判据。

4.4 条纹状粒子识别

条纹状粒子是由于采样速度和空速不匹配产生的，最常见的情况是在飞机起飞爬升阶段的速率失配，导致所采集到的圆形水滴粒子图像的线条数增多，粒子图像被拉长，从而成为条纹状粒子；此外冰粒子在仪器探头尖端或者采样窗口融化后为仪器采集或者粒子破碎导致的速度失配等也是条纹状粒子产生的主要原因，条纹状粒子的图像如图 1e 所示。对于该类型伪粒子的识别方法，最常见的

是采用粒径比(轴比)的识别方法(Baker et al., 2009)和面积比识别方法(Field et al., 2006)，但是简单地采用轴比或者面积比的识别方法会把某些擦边通过采样区的粒子误判为条纹状粒子，因此，为了减小误判情况的发生，加入擦边因子和簇因子，对条纹状粒子的识别进行限定。存在擦边情况下，条纹状粒子的簇因子需要上下各两个粒子均为条纹状粒子或者其下方或上方有 3 个以上粒子为条纹状粒子且至少有一个粒子不存在擦边情况，才能最终确定是否为条纹状粒子。通过增加限定因子可以有效地减少误判情况的发生。

4.5 空白粒子识别

空白粒子是指图像帧内没有存在任何粒子图像痕迹的粒子，空白粒子的具体粒子图像如图 1f 所示，因此只要粒子图像面积参数值为 0 即可识别为空白粒子。

5 伪粒子识别方法的应用

5.1 伪粒子及其各成分的出现概率

为了研究每一种形式的伪粒子在一次测量中的贡献，我们选取山西太原三次航测资料进行研究，其中 20080705 和 20100420 航次是在降水性混相云中探测获取的数据，20090619 航次是暖云中探测获取的数据，利用本文所提伪粒子识别方法，以类似破碎效率计算方式(Korolev and Isaac, 2005)，统计伪粒子及其各成分伪粒子在一次测量中的出现概率，统计结果如表 3 所示。

表 3 伪粒子及其各成分在山西太原三次航测中出现概率
Table 3 Occurrence probability of the pseudo particle and its components in the three research flights in Taiyuan, Shanxi

航次	仪器	出现概率					
		伪粒子	破碎粒子	并存粒子	条纹状粒子	线状粒子	空白粒子
20080705	CIP	45.2%	42.9%	2.36%	4.8%	0.01%	0.21%
20080705	PIP	10.8%	9.2%	0.64%	1.9%	0.0006%	0.16%
20090619	CIP	25.13%	23.58%	1.61%	2.88%	0.00%	0.16%
20090619	PIP	4.2%	2.06%	0.23%	1.93%	0.00%	0.14%
20100420	CIP	37.7%	36.32%	1.27%	2.04%	0.00%	0.18%
20100420	PIP	10.92%	10.29%	0.37%	0.7%	0.00%	0.16%

从表 3 中可看出，在三次航测中 PIP 仪器和 CIP 仪器所测数据均受到了伪粒子的影响，其中，PIP 仪器所测伪粒子数占总粒子数的比例是 4.2%~10.8%，平均值为 8.64%；而 CIP 仪器所测数据中的伪粒子出现概率是 25.13%~45.2%，平均值是

36.01%。从单次航测比较,伪粒子在 CIP 仪器中的出现概率是 PIP 仪器中出现概率的 3~6 倍,这说明了 CIP 仪器的测量过程更容易受到伪粒子的影响。从各伪粒子成分来看,虽然有部分粒子既可被判定为破碎粒子又可被识别为条纹状粒子,但由于这部分粒子数较少,并不会对两种伪粒子成分的比较造成影响。在单次航测中无论是 CIP 仪器还是 PIP 仪器,破碎粒子在所有伪粒子中出现的概率是最高的,其次是条纹状粒子和并存粒子,相对来说,空白粒子和线状粒子出现的概率是比较低的。此外,单从伪粒子数来看,三次航次中破碎粒子数在伪粒子总数中的占比平均为 76.26%(PIP)和 95%(CIP),因此破碎粒子在一次测量中对伪粒子的贡献是最大的,是伪粒子的主要来源。

5.2 不同航测阶段各伪粒子成分的出现概率

由于伪迹粒子的产生不仅和测量仪器有关,还和机载平台的飞行状态以及所测的大气环境因素相关,因此从 20080705 探测航次中选择了飞机不同的航测姿态下不同高度处的三个航测时段进行各成分伪粒子在探测到的粒子数据中出现概率的统计分析,其中时段 09:20:31~09:29:21 是飞机在云底爬升探测时段,09:40:11~09:47:16 是飞机从云顶下降探测阶段,09:47:36~09:53:36 是云中的平飞探测阶段,三个不同航测时段的识别统计结果具体如表 4 所示。

表 4 伪粒子及其各成分在山西、太原 20080705 航次三个不同时段中出现概率

Table 4 Occurrence probability of the pseudo particles and their components in the 20080705 research flight in Taiyuan, Shanxi

仪器	北京时间	出现概率					
		伪粒子	破碎粒子	并存粒子	条纹状粒子	线状粒子	空白粒子
CIP	09:20:31~09:29:21	41.46%	35.51%	2.3%	8.25%	0.00%	0.19%
CIP	09:40:11~09:47:16	61.66%	59.16%	4.44%	7.09%	0.005%	0.015%
CIP	09:47:36~09:53:36	27.84%	25.60%	0.34%	3.61%	0.00%	0.17%
PIP	09:20:31~09:29:21	5.81%	1.95%	0.37%	3.80%	0.00%	0.11%
PIP	09:40:11~09:47:16	14.7%	13.0%	1.76%	2.28%	0.002%	0.21%
PIP	09:47:36~09:53:36	6.89%	4.70%	0.12%	2.63%	0.004%	0.02%

从统计表伪粒子项中可以看出,在飞行探测的三个阶段,无论是 CIP 仪器还是 PIP 仪器,下降探测阶段的伪粒子出现概率均高于爬升探测阶段和平飞探测阶段伪粒子出现概率;就 CIP 仪器与 PIP 仪器两个测量仪器而言,在飞行探测的三个相应阶

段, CIP 仪器的伪粒子出现概率均高于 PIP 仪器的伪粒子出现概率。

从统计表中各伪粒子成分出现概率中可以看出,无论是 CIP 仪器还是 PIP 仪器,下降探测阶段与爬升探测和平飞探测阶段相比,其破碎粒子出现概率是最高的;而并存粒子的出现概率具有和破碎粒子出现概率相同的特征,即下降探测阶段出现的概率要高于其它两个探测阶段,这可能跟飞机飞行速度以及飞机飞行探测时的姿态有关。从观测资料看,爬升阶段的空速在 65 ms^{-1} 左右,而下降阶段和平飞阶段的空速均在 75 ms^{-1} 左右,因此与下降探测阶段相比,爬升探测的飞行速度相对较慢,粒子机械碰撞破碎或者气动破碎的概率就低,而下降阶段与平飞阶段的空速相当,因此飞机的飞行姿态导致了下降飞行阶段比平飞阶段具有更高的粒子破碎率。

此外,利用表 4 的破碎粒子项和伪粒子项可以计算出在不同的飞行探测阶段 CIP 的破碎粒子数均能占到伪粒子数的 85%以上,平均值为 91.18%。但是 PIP 的破碎粒子在伪粒子总数中的占比波动比较大,爬升探测阶段仅有 33.6%,平飞阶段是 59.9%,下降阶段则是 87.9%,平均值仅为 60.47%。CIP 中破碎粒子数在伪粒子数中的占比的平均值远高于 PIP 中破碎粒子数在伪粒子数中的占比平均值,这充分说明 CIP 仪器的机械结构更容易使云粒子发生破碎,此外,由于 CIP 的分辨率要高于 PIP,使得 CIP 能够测得更多的破碎粒子碎片,因此与 PIP 相比, CIP 的测量结果更容易受到伪粒子的影响,尤其是破碎的伪粒子。

从单一探测阶段来看,除了 PIP 的爬升探测阶段外,无论是 PIP 仪器还是 CIP 仪器,各伪粒子成分出现概率具有和整个航次探测数据统计表 3 相同的分布情况,即破碎粒子的出现概率最高、条纹状粒子次之,然后是并存粒子,而空白粒子和线状粒子出现概率是最低的。而表 4 中 PIP 的爬升探测阶段条纹状粒子的出现概率要高于破碎粒子的出现概率,这正好说明机载平台的飞行状态对伪粒子各成分的出现概率会造成影响。从历史资料看,爬升探测阶段往往会出现大量的条纹状粒子,这主要是因为飞机爬升时仪器的采样率与飞机的飞行速度出现了失配现象。根据所要研究目的的不同,会选择不同的飞行探测方式,因此在利用机载云降水粒子成像仪的数据时,仅仅关注破碎粒子是不够的,

对尽可能多的伪粒子进行识别与剔除是必要的。

5.3 粒子谱数据的订正

利用文中所提伪粒子识别方法对航测所得粒子图像资料进行数据质量订正, 这里选取 20080705 航次 09:40:11~09:47:16 时段和 20100420 航次 11:10:12~11:28:20 时段 CIP 和 PIP 所探测的资料进行伪粒子的识别与剔除, 以获取订正后的粒子谱数据。订正前(实线)和订正后(虚线)两个航次时段的粒子谱如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出, 运用本文所提伪粒子识别方法可以很好地把伪粒子和自然粒子分开。伪粒子对 CIP 和 PIP 两个仪器所测粒子谱的贡献在两个仪器的测量范围内均存在, 但是对粒子谱两端, 即小粒子谱和大粒子谱贡献较大。其中对 CIP 而言, 伪粒子对其小粒子谱的影响主要集中在 400 μm 以下, 但对其大粒子谱影响主要集中在 1000 μm 以上; 对 PIP 而言, 伪粒子对其小粒子谱的影响主要集中在 400 μm 以下, 但对其大粒子谱影响主要集中在 2000 μm 以上。此外, 从图中还可以看出运用所提伪粒子识别方法对

CIP 粒子谱的改善比对 PIP 粒子谱的改善比较大, 这也说明了伪粒子对 CIP 的影响比对 PIP 的影响更大。

5.4 伪粒子对粒子数浓度测量的影响

为了研究测量过程中的伪粒子对粒子数浓度测量结果的影响, 这里依然以 20080705 航次 09:40:11~09:47:16 时段和 20100420 航次 11:10:12~11:28:20 时段 CIP 和 PIP 所探测的资料为例研究伪粒子对粒子数浓度测量结果的影响。订正前(实线)和订正后(虚线)两个航次时段的粒子数浓度随时间变化情况如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出在时段 09:42~09:45 之间, CIP 和 PIP 均受到较为严重的伪迹影响, 尤其是 CIP 探头其数浓度经过订正后可降低一半左右。而从图 7 中可以看出在所选的时段内 CIP 和 PIP 均受到伪粒子的影响, 尤其是 CIP 探头在大部分时间内其伪粒子对粒子数浓度的影响均能达到一半以上, 个别时刻点的影响可使所测的粒子数浓度值增大 1 到 3 倍。而伪迹对 PIP 探头所测粒子数浓度的影响稍微小点, 大部分时间内

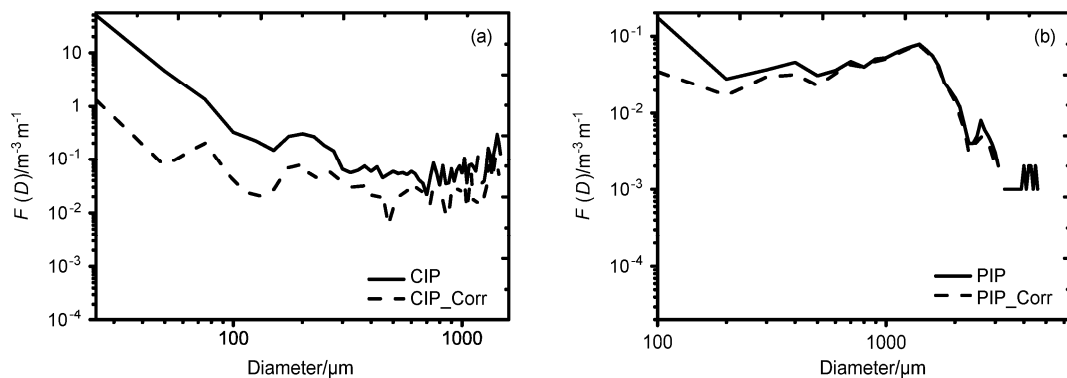


图 4 20080705 航测时段利用文中所提伪粒子识别方法对探头所测粒子数据进行订正前后对比: (a) CIP; (b) PIP。图中纵坐标中 $F(D)$ 表示粒子谱
Fig. 4 Comparison of size distribution before and after the artifacts corrections during flight 20080705: (a) CIP; (b) PIP. $F(D)$ means the particle spectrum

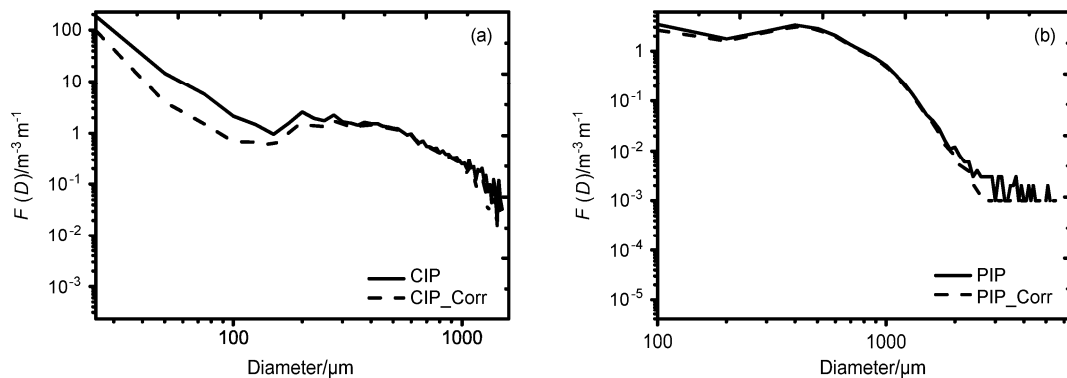


图 5 同图 4, 但为 20100420 航测时段

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for flight 20100420

在 6%~20%之间。

5.5 伪粒子对云水含量测量的影响

为了研究测量过程中的伪粒子对云中水含量测量结果的影响，这里依然以 20080705 航次 09:40:11~09:47:16 时段和 20100420 航次 11:10:12~11:28:20 时段 CIP 和 PIP 所探测的资料为例研究伪粒子对云中水含量测量结果的影响。由于所选的两个航次时段内的粒子均为冰相粒子，因此这里主要

研究伪粒子对云中冰水含量测量结果的影响。这里冰水含量的计算利用粒径与质量的经验公式，具体请参见文献(Brown and Francis, 1995)。订正前(实线)和订正后(虚线)两个航次时段的冰水含量值如图 8 和图 9 所示。从图 8 中可以看出伪粒子对探头测量的结果的影响也是集中在 09:42~09:45 时段，在此时段内，伪迹可使 CIP 探头所测冰水含量值增大 1.26 倍，而使 PIP 所测冰水含量值增

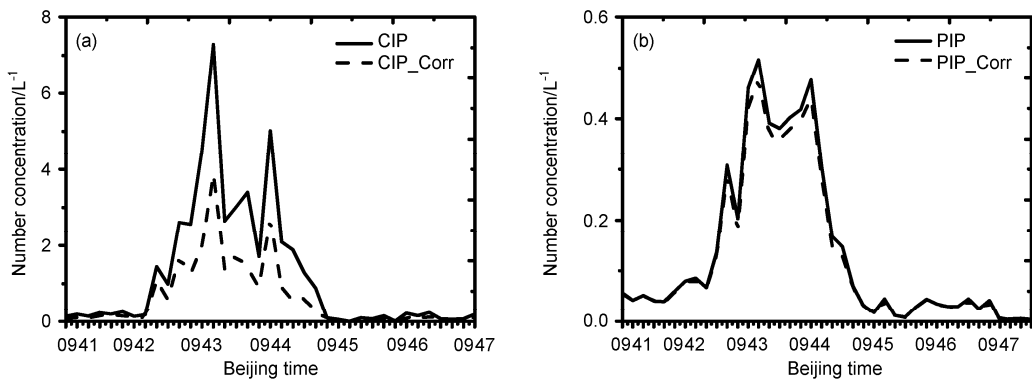


图 6 20080705 航测时段利用文中所提伪粒子识别方法对探头所测粒子数据进行订正前后粒子数浓度对比: (a) CIP; (b) PIP
Fig. 6 Comparison of particle number concentration before and after the artifacts corrections during flight 20080705: (a) CIP; (b) PIP

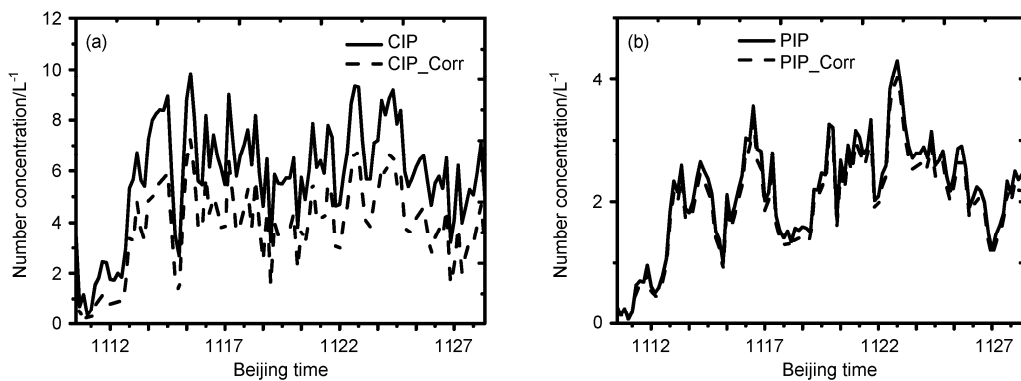


图 7 20100420 航测时段利用文中所提伪粒子识别方法对探头所测粒子数据进行订正前后粒子数浓度对比: (a) CIP; (b) PIP
Fig. 7 Comparison of particle number concentration before and after the artifacts corrections during flight 20100420: (a) CIP; (b) PIP

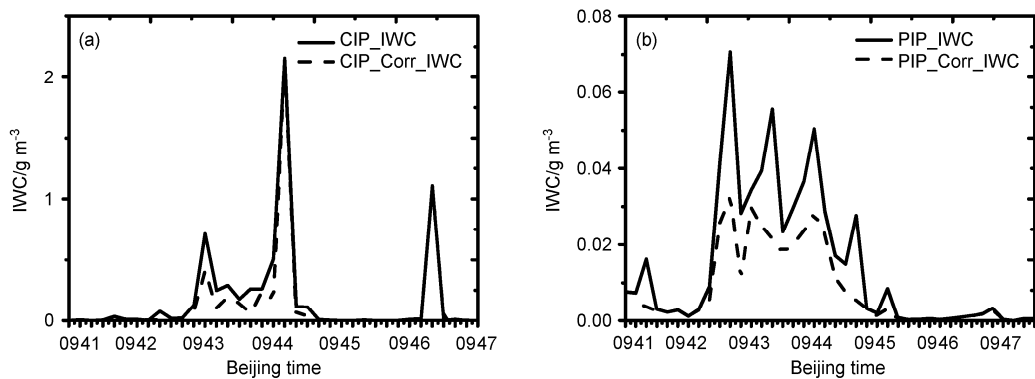


图 8 20080705 航测时段利用文中所提方法对探头所测粒子数据进行订正前后的云中冰水含量对比: (a) CIP; (b) PIP
Fig. 8 Comparison of ice water content(IWC) before and after the artifacts corrections during flight 20080705: (a) CIP; (b) PIP

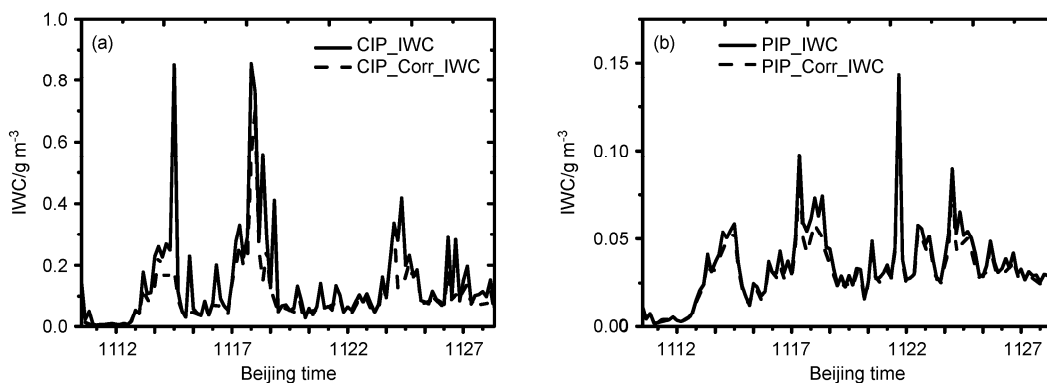


图9 20100420 航测时段利用文中所提方法对探头所测粒子数据进行订正前后的云中冰水含量对比: (a) CIP; (b) PIP
Fig. 9 Comparison of ice water content before and after the artifacts corrections during flight 20100420: (a) CIP; (b) PIP

大 0.79 倍。而从图 9 中则可看出伪迹对 CIP 探头和 PIP 探头所测数据的影响在所选时段内波动均很大, 就平均而言, 伪迹可使 CIP 探头所测冰水含量值增大 0.43 倍, 而使 PIP 探头所测冰水含量值增大 0.1 倍。

6 结果与讨论

本文对机载云降水粒子成像仪所测伪粒子图像进行了分类, 联合利用图像识别处理技术和到达时间间隔阈值方法, 提出了一个综合的伪粒子识别方法, 并将此方法应用于太原地区三次飞行航测的云粒子图像资料分析, 我们得到如下结果:

(1) 基于机载云降水粒子成像仪所测数据中伪粒子成因及其图像特点, 将伪粒子划分为破碎粒子、并存粒子、条纹状粒子、线状粒子和空白粒子, 并提出了各伪粒子成分的识别方法。利用文中所提伪粒子识别方法, 对三次航测数据中伪粒子及其各成分的出现概率进行统计表明, 在一次测量过程中伪粒子的出现概率最高可达 45.2%, 其平均出现概率分别是 36.01% (CIP) 和 8.64% (PIP); 在所有伪粒子成分中, 破碎形成的伪粒子的出现概率是最高的, 它可以占到伪粒子总数的 95% 以上; 破碎粒子的出现概率是最高的, 它是伪粒子中最主要的一个贡献者; 其次是条纹状粒子和并存粒子, 相对来说, 空白粒子和线状粒子出现的概率是比较低的。

(2) 虽然破碎粒子的出现概率往往是最高的, 但是在某些航测阶段, 比如爬升探测阶段, 会出现条纹状粒子出现概率要高于破碎粒子出现概率的情况, 该情况的出现说明了机载平台的飞行状态对伪粒子各成分的出现概率也会造成影响, 同时也说明了在利

用机载云降水粒子成像仪所测数据时, 仅仅利用到达时间间隔阈值方法对破碎粒子进行识别和剔除是不够的, 对尽可能多的伪粒子进行识别与剔除是必要的。

(3) 运用本文所提方法对两个航测时段的云粒子谱、粒子数浓度和冰水含量测量值订正表明, 伪粒子对 CIP 仪器测量结果的影响要大于对 PIP 仪器的影响。在两个仪器的测量范围内伪粒子对粒子谱的影响均存在, 但主要集中在粒子谱的两端, 即小粒子谱和大粒子谱。其中伪粒子对 CIP 小粒子谱的影响主要集中在 $400 \mu\text{m}$ 以下, 但对其大粒子谱影响主要集中在 $1000 \mu\text{m}$ 以上; 对 PIP 而言, 伪粒子对其小粒子谱的影响主要集中在 $400 \mu\text{m}$ 以下, 但对其大粒子谱影响主要集中在 $2000 \mu\text{m}$ 以上。

(4) 伪粒子可使 CIP 仪器所测粒子数浓度增大 1 倍以上, 而对 PIP 仪器所测粒子数浓度的影响相对较小。就仪器所测云中冰水含量而言, 不同仪器不同云况, 伪粒子对仪器测量结果的贡献不同。但从影响较为严重的时段看, 伪粒子可使 CIP 探头所测冰水含量值增大 1.26 倍, 而使 PIP 所测冰水含量值增大 0.79 倍, 这也说明了对伪粒子进行识别和剔除是很有必要的。

(5) 伪粒子在整个航测过程均存在, 其出现概率最高可达 45.2%。文章(黄敏松等, 2016)已经验证了到达时间间隔阈值方法对破碎粒子的识别准确率可以在 80% 以上, 由于破碎粒子是主要的伪粒子成分, 它平均可以占到一次探测过程中伪粒子总数的 95% (CIP) 和 76.26% (PIP), 而文中所提的并存粒子识别方法、条纹状粒子识别方法、线状粒子识别方法和空白粒子识别方法, 实则都是针对到达时间间隔阈值

方法在伪粒子识别方面的缺陷所进行的补充,因此,保守估计,文中所提伪粒子识别方法的识别准确率可以在80%以上。

(6) 从已有结果可以看出,伪粒子的出现除了与仪器的机械结构和工作测量原理有关外,还和机载平台的飞行状态以及测量时的环境因素有关,因此,所提方法和阈值对于以Y-12飞机为机载探测平台,以CIP和PIP为探测仪器所获取的其它航次云微物理图像资料处理也是有一定的参考使用价值。

致谢 感谢山西省人工降雨防雹办公室提供了文中太原航测资料,感谢中国科学院大气物理研究所沈志来老师对本文方法研究中给予的帮助和指导。

参考文献 (References)

- Baker B, Mo Q, Lawson R P, et al. 2009. Drop size distributions and the lack of small drops in RICO rain shafts [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48 (3): 616–623, doi:10.1175/2008JAMC1934.1.
- Baumgardner D, Dye J E. 1983. The 1982 cloud particle measurement symposium 4–7 May 1982, Boulder, Colo [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 64: 366–370.
- Brenguier J L. 1993. Observations of cloud microstructure at the centimeter scale [J]. *J. Appl. Meteor.*, 32 (4): 783–793, doi:10.1175/1520-0450(1993)032<0783:OOCMAT>2.0.CO;2.
- 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 (2): 410–414, doi:10.1175/1520-0426(1995)012<0410:IMOTIW>2.0.CO;2.
- Cooper W A. 1977. Cloud physics investigations by the University of Wyoming in HIPLEX 1977 [R]. Bureau of Reclamation Rep. AS 199, 321 pp.
- Field P R, Wood R, Brown 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 clouds [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23 (10): 1357–1371, doi:10.1175/JTECH1922.1.
- 高红波, 王卫星. 2007. 一种二值图像连通区域标记的新算法 [J]. *计算机应用*, 27 (11): 2776–2777, 2785. Gao Hongbo, Wang Weixing. 2007. New connected component labeling algorithm for binary image [J]. *Journal of Computer Applications (in Chinese)*, 27 (11): 2776–2777, 2785.
- Heymsfield A J, Baumgardner D. 1985. Summary of a workshop on processing 2-D probe data [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 66: 437–440.
- 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 Minsong, Lei Hengchi, Chen Jiatian, 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.
- 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 V, Strapp J W, Isaac G A. 1998. Evaluation of the accuracy of PMS optical array probes [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15 (3): 708–720, doi:10.1175/1520-0426(1998)015<0708:EOTAOP>2.0.CO;2.
- 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, 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. 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.
- Pawlowska H, Brenguier J L, Salut G. 1997. Optimal nonlinear estimation for cloud particle measurements [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14 (1): 88–104, doi:10.1175/1520-0426(1997)014<0088:ONEFCP>2.0.CO;2.