

龙玉燕,曹琪敏,周旭,等. 华中地区一次气溶胶与云微物理特性的飞机观测研究[J]. 气象研究与应用,2022,43(3):31–37.

Long Yuyan, Cao Qimin, Zhou Xu, et al. An aircraft observation study on the properties of aerosols and microphysical clouds in central China[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(3): 31–37.

华中地区一次气溶胶与云微物理特性的飞机观测研究

龙玉燕^{1,2}, 曹琪敏³, 周旭^{4,5}, 邹嘉南^{2,6*}, 张泽群^{1,2}

(1.中国气象科学研究院中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081; 2.南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 3.中山大学大气科学学院, 广东 珠海 510275; 4.中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081; 5.中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 10081; 6.中国气象局大气化学重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 基于 2018 年 12 月 10 日在华中地区的一次飞机观测, 利用 DMT 机载资料分析了华中地区的气溶胶与云微物理量的分布特征。结果表明, 气溶胶数浓度随着高度的增加而迅速降低, 低层气溶胶有效直径主要集中在 $0.4\mu\text{m}$ 。在高层, 上升段的气溶胶有效直径随着高度缓慢增加, 集中在 $2\sim 2.5\mu\text{m}$ 范围内; 下降段的气溶胶有效直径在垂直方向上复杂多变, 离散度也大, 主要集中在 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 。气溶胶粒子谱为多峰分布, 第一峰值直径在 $0.14\mu\text{m}$ 。气溶胶粒子主要集中在小粒径端, 随着粒子尺度的增大, 气溶胶浓度逐渐降低, 粒径在 $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ 之间的气溶胶浓度减小最快。在不同高度上的云滴谱均呈现多峰分布, 第一峰值直径在 $6\mu\text{m}$, 云滴谱宽约 $50\mu\text{m}$ 。

关键词: 华中地区; 飞机观测; 气溶胶; 云微物理

中图分类号: P412.24

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.3.06

引言

气溶胶是指悬浮在大气中的各种固体和液体粒子, 气溶胶粒子在云雾降水形成过程中起着重要的作用。当大气环境处于过饱和状态时, 气溶胶可以作为云凝结核(CCN)和冰核(IN)参与云的形成过程, 进一步影响云微物理特性, 从而间接影响气候变化, 即气溶胶的间接辐射效应^[1]。华中地区是我国气溶胶数浓度较高的区域之一, 河南省郑州市近些年来污染较为严重^[2]。韦增岸等^[3]指出, 在人影作业前期, 若能合理规划作业区域、范围以及高度, 制定详细的作业方案, 能够增强飞机人工增雨的效果。钟小英^[4]通过提取广西冬季两个月的飞机作业数据, 对人工增雨作业效果进行了评估, 为广西开展冬季人工增雨作业的可行性提供了依据。因此, 利用机载资料对华中地区的气溶胶和云微物理特征进行研究具有重大的现实意义, 不仅能够增强对气溶胶-云效应

的认识, 还能提高云模式的准确率, 从而更加有效地指导人影作业的开展。

20 世纪 50 年代以来, 关于气溶胶与云微物理特性的飞机观测试验在国内外相继开展。Snider 等^[5]在第二次气溶胶表征实验(ACE-2)期间, 研究了层积云特性与气溶胶之间的关系, 指出基于上升气流速度和 CCN 活化谱的液滴浓度计算结果与直接观测结果一致, 并改进了气溶胶和云微物理之间相互作用的模拟模型。李军霞等^[6]利用 2013 年 7 月和 8 月的 6 次全面观测的飞机数据对黄土高原地区的气溶胶进行研究, 结果表明: 逆温层造成了气溶胶积聚, 使得气溶胶数浓度随海拔呈指数下降, 但气溶胶的平均粒径随高度不断增大。蔡兆鑫等^[7-8]在山西忻州进行了气溶胶和浅积云的飞机观测, 对华北地区的气溶胶、云凝结核和浅层云的微物理特征进行了细致的分析, 并对气溶胶与云的相互作用机理进行了深入的探讨, 同时还研究了大陆性积云不同发展

收稿日期: 2022-06-26

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究项目(21KJB170002)、中国气象局大气化学重点开放实验室开放课题(2022B08)

作者简介: 龙玉燕(1999—), 女, 广西玉林人, 硕士研究生, 从事云降水物理学研究。E-mail: 2521918656@qq.com

* 通讯作者: 邹嘉南(1990—), 男, 浙江嘉兴人, 博士, 讲师, 主要从事大气物理学研究。E-mail: zoujn16@lzu.edu.cn

阶段宏观和微观物理特性。彭冲^[2]利用飞机微物理探测资料,对2018年3月26日河南中北部地区一次气溶胶分布特征进行了综合分析,比较了郑州市区与郊区的积聚模态气溶胶粒子的分布情况以及CCN的活化率。

本文基于2018年12月10日一次华中地区的飞机观测,利用机载资料分析了华中地区的气溶胶与云的分布特征。

1 实验与方法

1.1 机载探头介绍

本次研究使用的是新舟60,飞机上搭载了美国DMT云物理探测系统,机载采样探头^[9]主要包括:(1)二维降水粒子探头(PIP,Precipitation Imagine Probe):该探头为图像探头,探测范围为100~6200 μm,分辨率为100 μm,共分为62档,主要用于探测降水粒子,能够实时显示降水粒子的二维图像和一

维粒子谱分布。(2)云粒子图像探头(CIP,Cloud Imagine Probe):该探头为图像探头,探测范围为25~1550 μm,分辨率为25 μm,分为62档,主要用于探测冰晶粒子和云滴。(3)云粒子探头(CDP,Cloud Droplet Probe):该探头为前向散射探头,探测范围为2~50 μm,分为30档,用来探测云滴、霾等粒子。(4)气溶胶探头(PCASP,Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe):该探头为气溶胶粒子散射探头,此次使用的气溶胶探头型号为PCASP-100X,探测范围为0.1~3 μm,分为30档,可用来探测气溶胶粒子。(5)热线含水量仪(Hotwire LWC,The hot-wire cloud liquid water content):使用加热的传感线圈测量液体含水量。(6)飞机综合气象要素测量系统(AIMMS-20,Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System):主要用于探测风向风速、温度、相对湿度、压强、真空速、轨迹(经纬度)等参数。在探测之前,所有仪器均经过地面标定,各探头参数如表1所示。

表1 各探头参数列表

探头名称	分档数量	探测范围/μ m	探测内容
PIP	62	100~6200	降水粒子
CIP	62	25~1550	冰晶粒子
CDP	30	2~50	云粒子
PCASP-100X	30	0.1~3	气溶胶粒子
Hotwire LWC			液态水含量
AIMMS-20			温、风、湿、压、经纬度

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

文中使用的数据为北京人工影响天气办公室编号为B3435的飞机新舟60在2018年12月10日的机载探测数据,起飞机场在新郑国际机场(郑州),起飞的时间为16:01:54,郑州市区为轻度污染,云中液态水和冰晶共存。

1.2.2 数据处理

(1)数据预处理:利用3σ原则剔除CIP、CDP、PIP、PCASP和AIMMS-20中的异常数据,如AIMMS-20中经纬度不符、高度个例突变等情况。

(2)分析气溶胶谱分布时,由于第一档(Bin1)数据误差较大,因此应把第一档的数据剔除^[10]。各尺度间隔内气溶胶度尺度分布函数 $n_i = \frac{N_i}{V\Delta D}$,单位为 $cm^{-3}\mu m^{-1}$,ΔD为直径间隔(档宽),探头PCASP-100X采用不等间隔, N_i 为一个采样周期内测得的直径在

$D_i \sim D_i + \Delta D$ 之间的粒子数目,采样体积 $V = \frac{c}{f}$,c为采样流量($cm^3 s^{-1}$),f为采样频率(s^{-1})。

(3)分析云滴粒子谱分布时,也要剔除第一档的数据,以免误差较大造成结果干扰^[10]。每档粒子数浓度 $C_i = \frac{N_i}{Svt}$,各档谱分布 $n_i = \frac{C_i}{\Delta D}$,单位为 $cm^{-3}\mu m^{-1}$ 。其中 N_i 为每档的粒子个数,S为采样面积,v为真空速,t为采样时间,ΔD为档宽。下文有关符号意义见表2。

表2 符号说明

符号	含义	单位
N_a	气溶胶粒子数浓度	cm^{-3}
N_c	云滴粒子数浓度	cm^{-3}
N_i	冰晶粒子数浓度	cm^{-3}
N_p	降水粒子数浓度	cm^{-3}
E_a	气溶胶粒子有效直径	μm
E_c	云滴粒子有效直径	μm
LWC	液态水含量	$g \cdot m^{-3}$

1.3 飞行方案描述

从飞行三维轨迹(图 1)来看,飞机在起落阶段以垂直探测为主,经过许昌市上空逐渐爬升到 3610m 高度,然后平飞,接着在 2300~2900m 高度范围内呈“s”型盘旋 3 次,最后经过太康县和中牟县上空逐渐下降回到新郑国际机场。

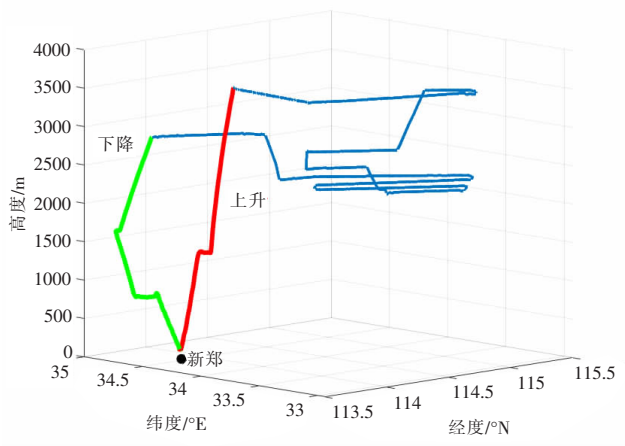


图 1 飞行三维轨迹

2 结果与分析

2.1 华中地区气溶胶物理特征

本文选取飞机在图 1 上升(红色段)和下降(绿色段)的两个阶段进行垂直方向上的气溶胶探测分析,从而获得气溶胶在一定区域内垂直方向上的变化特征。

2.1.1 大气层结情况

由图 2 可以看出,在上升和下降阶段,大气的温度层结均为不稳定的,位温随着高度升高而降低。上升阶段最低温度可达到 230K,且在 2400m 高度附近存在一个浅薄的逆温层。两个阶段的相对湿度随着高度增加而不断增大,下干上湿甚至在高层相对湿度超过了 100%,处于过饱和状态,由此可知,飞机在高层穿过了云层。

2.1.2 气溶胶浓度与有效直径的垂直分布

对气溶胶探头探测到的气溶胶数浓度和有效直径作 200m 高度上的平均,同时制作误差棒以方便分析离散度。因此,在 500m 高度上的数据为 400~600m 高度范围内的观测结果的平均值和误差值。

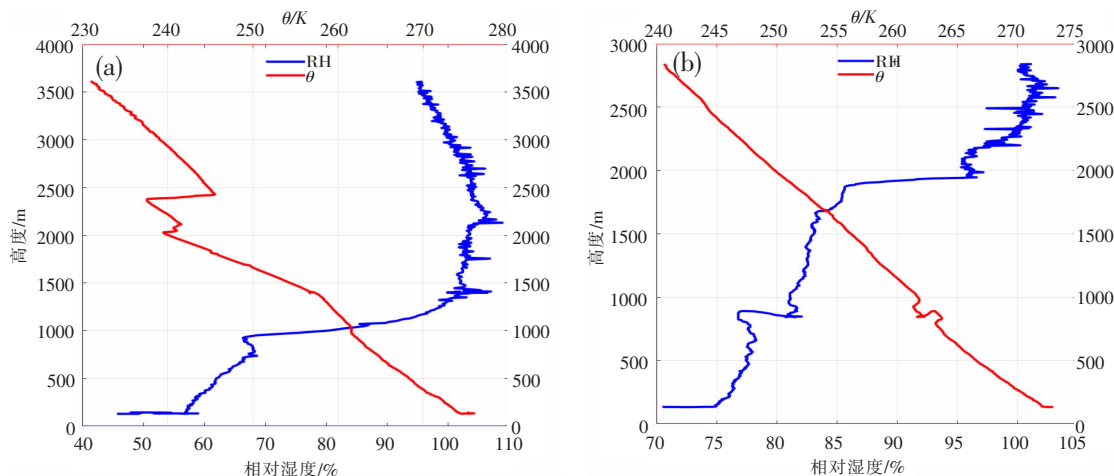


图 2 上升和下降阶段的大气层结情况

(a)上升阶段;(b)下降阶段

无论在上升(图 3a)还是下降阶段,在 1000m 高度以下,气溶胶的数浓度都大于 2000cm^{-3} ,且数浓度的离散度较大,说明低层气溶胶粒子主要来源于地面。在 1000m 高度以上,由于重力沉降作用,气溶胶的数浓度随着高度增加而递减,在高层数浓度非常小。在下降阶段(图 3b),气溶胶数浓度随着高度增加先增大后减小,但下降阶段的温度层结是不稳定层结,不存在逆温层,这可能是由于下降的时候,水

平方向飞过的范围很大,气溶胶区域特征相差比较大,所以导致气溶胶浓度的垂直分布会出现随高度增大的趋势。

由图 3c、d 可以看出,这两个阶段的气溶胶有效直径的垂直分布存在明显的差异。在 1000m 高度以下,两者的有效直径均集中在 $0.4\mu\text{m}$ 附近。在 1000m 高度以上,上升段有效直径随着高度增加而增大,最大有效直径为 $2.4\mu\text{m}$,但该层误差较大,说

明该层气溶胶的有效直径的离散度较高;对于下降段,有效直径的分布复杂多变,离散度也大,其最大值为 $1.5\mu\text{m}$ 。由此可见,在高层,上升阶段气溶胶大粒子所占的比例要大于下降阶段,因为在云中过饱

和度环境下,有一些气溶胶粒子可以作为云凝结核被活化,形成小云滴,然后通过凝结增长,使得粒子尺度有所增大。

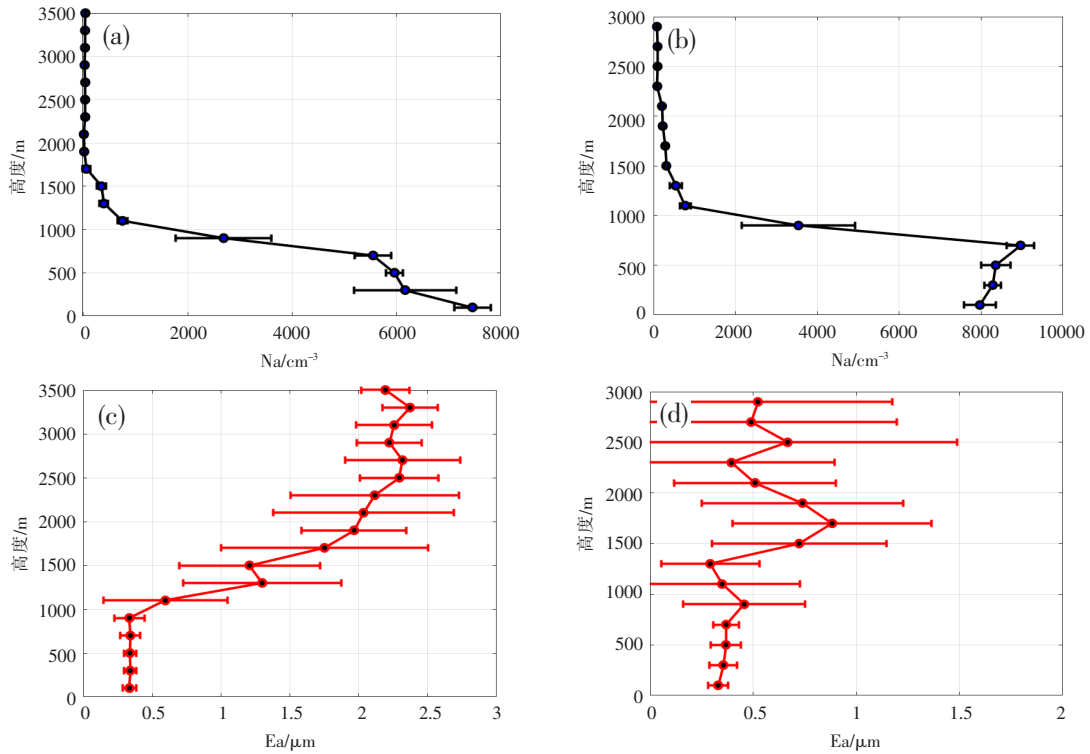


图3 上升和下降阶段气溶胶数浓度与有效直径的垂直廓线
(a)气溶胶数浓度垂直廓线(上);(b)气溶胶数浓度垂直廓线(下);
(c)气溶胶有效直径垂直廓线(上);(d)气溶胶有效直径垂直廓线(下)

2.1.3 气溶胶粒子谱的垂直分布

研究气溶胶粒子谱分布时,对各档的气溶胶粒子个数在 500m 高度范围内取平均值。由图4可以发现,无论上升阶段还是下降阶段,气溶胶粒子谱均为多峰型分布。大部分气溶胶粒子处于小粒径端,而

且气溶胶浓度随着尺度的增大而逐渐降低,其中在 $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ 降低得最明显。低层的气溶胶浓度明显高于高层,随着高度不断增加,各粒径段的气溶胶浓度都有所降低,特别在小粒径端,气溶胶浓度减低非常明显;而在大粒子端,随着高度增加,气溶胶浓度

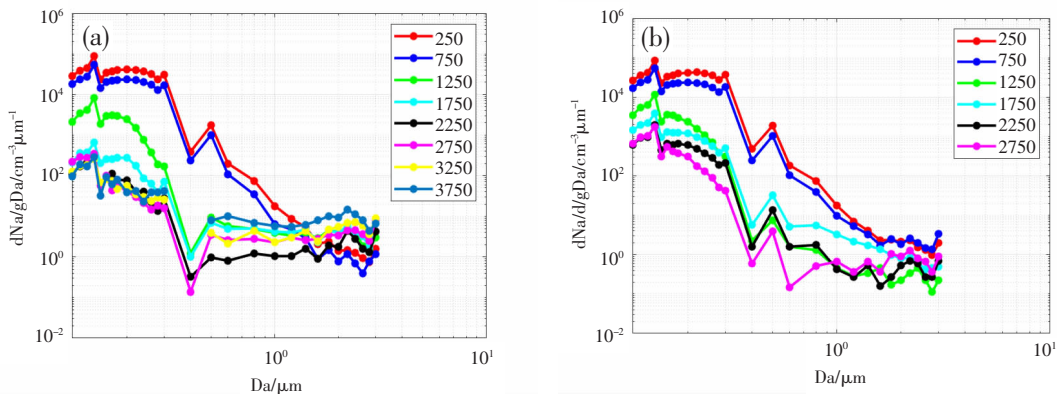


图4 上升和下降阶段气溶胶粒子谱的垂直分布
(a)气溶胶粒子谱(上升段);(b)气溶胶粒子谱(下降段)

变化不明显。

两个探测阶段的大气层结情况类似, 但由于经过的下垫面不一样, 因此气溶胶粒子谱的垂直分布会存在差异。两者的气溶胶粒子谱分布均为多峰型, 第一峰值直径都在 $0.14\mu\text{m}$ 。对比图 4a、4b 发现, 在 1250m 高度以下, 两个阶段的气溶胶粒子谱分布基本一致。在 1250m 高度以上, 两个阶段的粒子谱型明显不同: 在小粒子端, 下降阶段气溶胶浓度要高于上升阶段, 可能是与下降探测区域的气溶胶近地面来源增加有关; 而在大粒子端, 上升阶段的气溶胶浓度则高于下降阶段, 这是因为上升阶段穿云的时间大于下降阶段, 而飞机穿过云层时探头 PCASP-100X 探测到的气溶胶数据会受到云中云滴粒子的干扰, 导致该探头测到的气溶胶粒子在大粒子端占的比例增大。

2.2 华中地区的云微物理特征

2.2.1 入云条件

在分析云微物理特征之前, 首先要设置一个合适的入云条件。参考前人研究^[11], 以及此次飞机探测的实际情况, 本文设置入云条件为: (1) 液态水含量 $\text{LWC} > 0.001\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; (2) 云滴粒子数浓度 $N_c > 10\text{cm}^{-3}$; (3) 相对湿度 $\geq 95\%$; (4) 上述条件持续时间超过 10s。

根据设置的入云条件和飞机探测方式, 选取图 5 黑色箭头所标注的两个阶段 A 和 B 来分析混合云的云微物理特征。其中 A 段称为不等间隔分层水平探测^[10], B 段为水平探测。

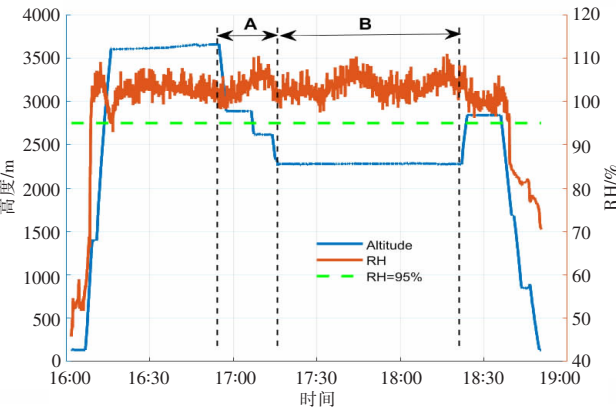


图 5 飞行高度与相对湿度的时间变化

2.2.2 间隔分层水平探测的云微物理特征

(1) 云微物理量的垂直分布

根据入云条件可知(表 3), 飞机在 A 段云中探测的时间为 16:47:05—17:20:08。为了研究飞机在穿

云过程中云微物理量在 2258~3660m 上的垂直分布特征, 对机载探头 LWC 和 CDP 探测到的云微物理量资料作 100m 高度平均。

表 3 A 和 B 两个阶段的飞行信息表

	A	B
探测方式	间隔分层水平	水平
探测时间	16:47:05—17:20:08	17:20:08—18:22:05
探测高度/m	2258—3660	平飞, 约 2280

由图 6 可知, 液态水含量 LWC 的值小于 $0.6\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 随着高度的增加而逐渐减小, 在 2650m 高度上的离散度最大。云滴数浓度 N_c 随着高度不断增加, 最大值可达 500cm^{-3} , 在 2850m 高度以上, N_c 的离散度较大。而云滴有效直径 E_c 的垂直廓线是先减小后增大, 在 2550~2850m 高度范围内, 尺度变化不明显, $E_c < 20\mu\text{m}$, 说明云中以凝结增长为主。

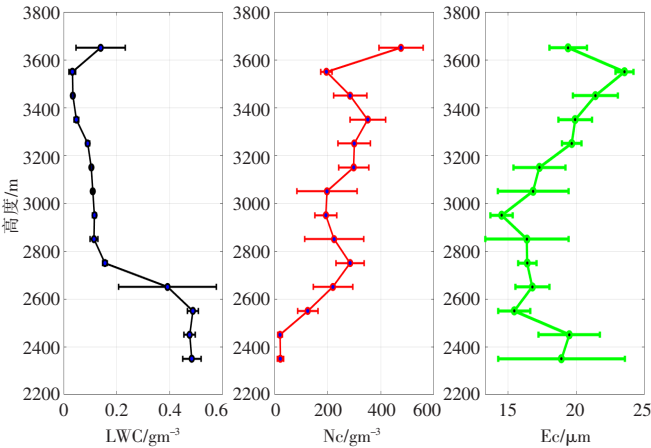


图 6 云微物理量的垂直廓线

(2) 云滴粒子的谱分布

研究云滴粒子在不同高度上的谱分布时, 同样取 100m 高度平均。图 7 是云滴粒子的谱分布, 在不同高度上均呈现多峰分布, 第一峰值直径为 $6\mu\text{m}$, 第二峰值直径为 $13\mu\text{m}$ 。在小粒子端, 各个高度上的云滴粒子谱的谱型非常相似; 而在大粒子端, 谱型比较多样化。大部分云滴粒径集中在 $20\mu\text{m}$ 内, 直径大于 $30\mu\text{m}$ 的云滴粒子所占比例很小, 说明云内以凝结增长为主。随着高度的增加, 云滴数浓度逐渐增加, 在 2350~2550m 高度范围内数浓度增加得比较明显。

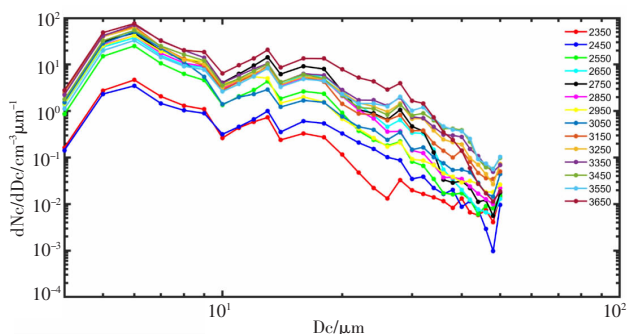


图7 云滴在不同高度的谱分布

2.2.3 水平探测的云微物理特征

结合入云条件可知,飞机在水平探测阶段(B段)有四次明显的穿云过程,如表4所示。

表4 穿云过程与时间信息表

穿云过程	穿云时间
I	17:36:11—17:38:33
II	17:39:38—17:46:08
III	18:10:19—18:13:58
IV	18:16:45—18:17:51

为研究空间水平方向上的混合云中的粒子谱分布特征,分析了B段四次不同的穿云过程(I、II、III和IV)的云滴粒子在2280m高度上的谱分布情况。图8为四次穿云过程的云滴谱分布图,均呈现多峰分布,第一峰值直径为6μm,第二峰值直径为13μm。过程I和III的云滴谱较窄,I的云滴谱宽为34μm,II的云滴谱宽约为30μm;而过程II和IV的云滴谱宽为50μm。当粒径小于20μm时,四个过程的云滴谱型很相似。从过程I到过程II,云滴谱变宽,云滴谱宽从34μm增加到50μm,小于20μm的

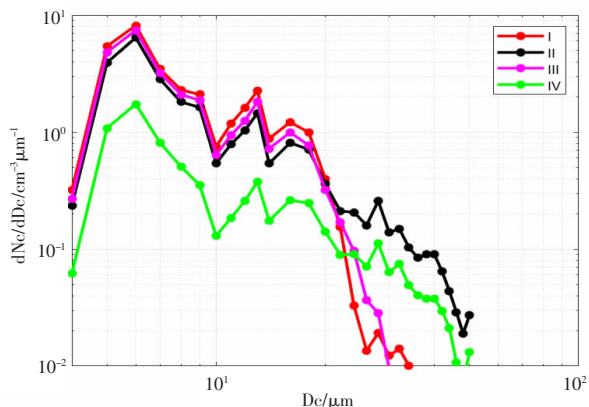


图8 四次穿云过程云滴粒子谱分布

云滴数浓度有所降低,大于20μm的云滴数浓度明显增加。由此可知,在过程I,云滴以凝结增长为主,因此云滴谱较窄;在过程II,云滴主要通过碰并增长使得云滴尺度增长到较大尺度,从而云滴谱拓宽。从过程III到过程IV变化与过程I到过程II类似,云滴通过碰并增长扩宽谱,云滴尺度可增大到50μm。

3 结论

本文基于2018年12月10日飞机在华中地区(河南)的机载资料,分析华中地区的气溶胶与云微物理量的分布特征,得到以下结论:

(1)气溶胶数浓度随着高度的增加而迅速减低,在高层气溶胶数浓度非常小。在低层,气溶胶有效直径主要集中在0.4μm,气溶胶数浓度超过2000cm⁻³。在高层,上升段的气溶胶有效直径随着高度缓慢增加,集中在2~2.5μm范围内;下降段的气溶胶有效直径在垂直方向上复杂多变,离散度也大,主要集中在0.5~1μm。气溶胶粒子谱都为多峰型,第一峰值直径在0.14μm,大多数气溶胶粒子处于小粒径端,随着粒子尺度的增大,气溶胶浓度逐渐降低,粒径在0.3~0.4μm之间气溶胶浓度减小得最快。

(2)在穿云过程中液态水含量随着高度增加而降低,云滴数浓度随高度增大,云滴有效直径随高度先减小后增大。在不同高度上的云滴谱均呈现多峰分布,第一峰值直径在6μm,云滴谱宽为50μm左右。

(3)四次穿云过程的云滴谱均为多峰型,过程I和III的云滴谱较窄,分别为34μm和30μm,而过程II和IV的云滴谱宽为50μm。

参考文献:

[1] 李军霞,银燕,李培仁,等.气溶胶影响云和降水的机理和观测研究进展[J].气象科学,2014,34(5):581-590.

[2] 彭冲.河南春季一次气溶胶分布特征的飞机探测研究[J].气象与环境科学,2020,43(2):87-92.

[3] 韦增岸,张正国,程鹏,等.广西一次飞机增雨过程个例分析[J].气象研究与应用,2019,40(3):90-93,116.

[4] 钟小英.飞机人工增雨作业效果分析[J].气象研究与应用,2010,31(2):91-93,114.

[5] Snider J R, Brenguier J L. Cloud Condensation Nuclei and Cloud Droplet Measurements during ACE-2 [J]. Tellus: Series B, Chemical and Physical Meteorology, 2010, 52(2):828-842.

[6] Li J X, Liu X G, Yuan L, et al. Vertical distribution of aerosol optical properties based on aircraft measurements

- over the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 155: 73–86.
- [7] 蔡兆鑫, 蔡森, 李培仁, 等. 华北地区一次气溶胶与浅积云微物理特性的飞机观测研究[J]. *大气科学*, 2021, 45(2): 393–406.
- [8] 蔡兆鑫, 蔡森, 李培仁, 等. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. *大气科学*, 2019, 43(6): 1191–1203.
- [9] 马新成, 黄梦宇, 张晓庆, 等. DMT 机载大气探测系统介绍[C]//中国气象学会 2006 年年会“人工影响天气作业技术专题研讨会”分会场论文集, 2006: 600–605.
- [10] 李义宇. 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, 2015.

An aircraft observation study on the properties of aerosols and microphysical clouds in central China

Long Yuyan^{1,2}, Cao Qimin³, Zhou Xu^{4,5}, Zou Jianan^{2,6*}, Zhang Zequn^{1,2}

- (1. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory for Aerosol–Cloud–Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 510275, China; 4. Weather Modification Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 5. Cloud–Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory, China Meteorological Administration, Beijing 100081; 6. Key Laboratory of Atmospheric Chemistry, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Based on an aircraft observation in Central China on December 10, 2018, this paper analyzes the distribution characteristics of aerosol and cloud microphysical quantities in Central China by using DMT airborne data. The results show that the aerosol number concentration decreases rapidly with the increase of altitude, and the effective diameter of low-level aerosol is mainly concentrated at $0.4\mu\text{m}$. In the upper layer, the aerosol effective diameter in the ascending section increases slowly with the height, and is concentrated in $2\sim 2.5\mu\text{m}$; The aerosol effective diameter in the descending section is complex and changeable in the vertical direction, and the dispersion is also large, mainly concentrated in $0.5\sim 1\mu\text{m}$. The aerosol particle spectrum is multi-modal, and the diameter of the first peak is $0.14\mu\text{m}$. Aerosol particles are mainly concentrated at the small particle size. With the increase of particle size, the aerosol concentration gradually decreases, and between $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ decreases the fastest. The cloud drop spectra at different heights show a multi peak distribution, and the diameter of the first peak is $6\mu\text{m}$. The spectral width of cloud drops is about $50\mu\text{m}$.

Key words: Central China; aircraft observation; aerosol; cloud microphysics