

李义宇, 孙鸿娉, 杨俊梅, 等. 华北中部夏季气溶胶和云分布特征. 应用气象学报, 2021, 32(6): 665-676.

DOI: 10.11898/1001-7313.20210603

华北中部夏季气溶胶和云分布特征

李义宇¹⁾ 孙鸿娉^{1)*} 杨俊梅¹⁾ 任刚¹⁾

赵德龙²⁾ 周崑²⁾ 刘智超³⁾

¹⁾(山西省人工增雨防雷技术中心, 太原 030002)

²⁾(北京市人工影响天气中心, 北京 100089)

³⁾(中国人民解放军 95820 部队飞行管制室, 北京 102207)

摘 要

气溶胶与云的垂直分布特征是气溶胶间接气候效应关注的重点。基于 2018 年 7—8 月华北中部 6 架次飞机观测数据, 研究气溶胶和云滴的垂直和水平分布特征。结果表明: 华北中部 780~5687 m 高度内气溶胶数浓度(N_a)平均值为 821.36 cm^{-3} , 最大量级可达到 10^4 cm^{-3} , 云中气溶胶数浓度(N_{acc})占总颗粒浓度的 80% 以上, 表明细颗粒占大多数, 气溶胶粒子算术平均直径(D_m)平均值为 $0.12\sim 0.52 \mu\text{m}$; 大气层结对气溶胶垂直分布影响较大, 逆温阻挡气溶胶垂直输送, 高空(高度 2000 m 以上) D_m 的垂直分布受到相对湿度影响较大; N_a 和 D_m 在垂直方向波动较大, 水平方向波动较小; 低层云中云滴数浓度(N_c)较大、液态水含量(L)较小, 而中层和高层云中 N_c 较小、 L 较大, N_c 和云滴有效半径(R_c)的概率密度函数均为双峰型分布, L 的概率密度函数为单峰型分布; 气溶胶数浓度谱基本呈现多峰型分布, 而云滴数浓度谱多呈现单峰型分布。

关键词: 华北中部; 气溶胶; 云滴; 飞机观测

引 言

气溶胶既可以通过吸收和散射太阳辐射影响地气系统的辐射平衡, 也可以作为云凝结核(CCN)影响云微物理过程进而影响气候^[1-2]。气溶胶对云微物理过程的影响机制较为复杂, 是近年的研究热点和难点, 气溶胶的垂直分布状况对于量化气溶胶的间接辐射强迫具有重要价值, 不同背景下对流层低层气溶胶的垂直分布状况存在很大不确定性, 因此对气溶胶垂直廓线的研究十分重要^[3-6]。气溶胶数浓度和有效半径以及云液态水含量是描述大气气溶胶与云相互作用的关键参数^[7-8]。为了量化气溶胶的气候效应, 国内外学者已开展大量地面观测试验及数值模拟研究, 但对气溶胶的地面观测大多只能分析其时间分布特征, 难以得到空间分布特征^[9-16]。

利用飞机搭载各种气溶胶探测设备, 对大气气溶胶展开空间观测, 可获得气溶胶数浓度和平均半径的空间分布特征, 是研究气溶胶垂直廓线以及气溶胶与云相互作用的最直接方法之一, 也可为数值模式提供观测数据^[17-19]。

近年, 针对气溶胶垂直分布的飞机观测试验相继开展。研究发现, 气象条件影响气溶胶垂直分布, 温度和相对湿度的垂直廓线与气溶胶垂直分布存在明显关联, 不同天气形势下大气层结变化也影响气溶胶的空间分布^[20-23]。将 CCN 与气溶胶垂直廓线结合可以判断气溶胶的主要来源及传输, 研究不同过饱和度下气溶胶与 CCN 的转化率, 可以分析气溶胶活化能力的空间分布进而探究气溶胶与云相互作用机制^[24-25]。气溶胶数浓度的谱宽随高度升高变窄, 气溶胶数浓度的谱分布可以由多个对数正态曲线进行拟合, 得到的拟合参数可为数值模式中气溶

2021-08-05 收到, 2021-10-20 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501405, 2019YFC1510304), 国家自然科学基金项目(41575133)

* 通信作者, 邮箱: 356286923@qq.com

胶参数化的建立和改进提供参考^[26-27]。

气溶胶对云和降水的影响随动力、热力和微物理条件变化而变化。不同地区、不同天气背景下气溶胶与云的时空分布特征以及气溶胶与云相互作用等过程非常复杂^[28-29]，相关学者根据每次个例得到的结论不尽相同。因此，要全面客观探究气溶胶与云的相互作用机制，仍然需要在不同地区开展气溶胶和云的综合观测试验。

山西省地处华北平原西面的黄土高原，属于温带季风性气候，煤炭产业集中，环境污染形势严峻^[30-32]，在山西省开展气溶胶与云的垂直探测具有重要意义。本研究基于2018年7—8月山西省中部6次飞机观测试验数据，研究不同高度气溶胶及云的分布特征。

1 观测与数据

1.1 观测仪器

本研究以空中国王飞机(King-350)为主要空中观测平台，该飞机一般飞行速度为 $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，爬升和下降速度为 $7 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。气溶胶粒子空间分布的主要观测设备为1台被动空腔气溶胶探头

(PCASP-100X)，观测粒径范围为 $0.1 \sim 3 \mu\text{m}$ ，分为30个通道，测量的最小分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ ，数据采样频率为1 Hz，采样间隔为1 s。PCASP-100X在试验前进行标准PSL标定和流速标定。云滴观测的主要仪器为美国DMT公司生产的云粒子谱探头(CDP)，观测的云滴谱范围为 $3 \sim 50 \mu\text{m}$ ，分为30个通道，通道1~12的分辨率为 $1 \mu\text{m}$ ，通道13~30的分辨率为 $2 \mu\text{m}$ ，数据采样频率为1 Hz。对于PCASP-100X和CDP，由于其第1档数据尺度范围不易确定且受到仪器信号噪音影响较大，因此剔除第1档数据。飞机综合气象要素测量系统(AIMMS-20)设备包括ADP(大气数据探头)、GPS天线、GPS模块等，主要测量环境温度、气压、动压、相对湿度、风速、风向、垂直风速、飞行经纬度和飞行高度(均为海拔高度，以下简称高度)等。

1.2 探测概况

气溶胶观测试验主要集中在山西省中部地区，太原为飞机观测基地，起降机场为太原武宿机场。飞机于2018年7月21日、2018年7月26日、2018年7月31日、2018年8月22日上午、2018年8月22日下午和2018年8月30日开展6架次飞行，飞行详细信息见表1(本研究所有时间均为北京时)。

表1 观测飞行概况

Table 1 Summary of six flights

编号	日期	飞行观测时间	垂直高度范围/m	天气条件
F1	2018-07-21	11:48—13:00	786~5044	中-低层云
F2	2018-07-26	16:09—17:10	780~3778	中-高层云
F3	2018-07-31	17:26—18:52	782~4410	高层云
F4	2018-08-22	10:50—12:14	788~4685	中-高层云
F5	2018-08-22	16:36—17:40	785~4691	中-低层云
F6	2018-08-30	13:53—15:26	786~5687	中-低层云

1.3 数据处理

本研究中，云需同时满足云滴数浓度(N_c)大于 10 cm^{-3} 、液态水含量(L)大于 $0.001 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 两个条件，且持续时间超过 5 s ^[33]。根据Kleinman等^[33]的研究结果，对云中气溶胶数据进行校正，PCASP-100X测得的气溶胶数浓度(N_a)在通道2~6内减少20%，通道7~25内减少10%，经过计算后的云中气溶胶数浓度记为 N_{acc} 。

2 结果分析

2.1 气溶胶垂直和水平分布特征

表2为6架次飞机观测的气溶胶参量统计值。

N_a 最大值出现在2018年7月26日(F2)，达到 10493.30 cm^{-3} ，平均值为 821.36 cm^{-3} ，同时 N_{acc} 占比最低，且算术平均直径(D_m)和相对湿度最小。相对湿度较低，不利于粒子吸湿增长，导致粒子平均直径较小，天气条件为中高层云时， N_a 平均值高于天气条件为中低层云时(有降水时除外)。

总体而言，在 $780 \sim 5687 \text{ m}$ 高度内， N_a 的最大量级可达到 10^4 cm^{-3} ，比Yang等^[34]在华中地区飞机观测结果高1个量级。观测期间， N_{acc} 占比均在80%以上，Hao等^[35]在安徽地区的观测显示 N_{acc} 占比可达95%以上。 D_m 平均值为 $0.12 \sim 0.52 \mu\text{m}$ ，与中国其他地区的飞机观测结果具有相同数量级^[35-36]。

表2 气溶胶参量统计值

Table 2 Statistics of observed aerosol parameters

架次	N_a/cm^{-3}				$D_m/\mu m$		
	平均值	最大值	标准差	N_{acc}	平均值	最大值	标准差
F1	114.97	1275.69	195.93	98.83	0.43	2.65	0.43
F2	821.36	10493.30	911.91	663.36	0.12	0.53	0.01
F3	198.27	3001.23	280.91	176.64	0.43	2.72	0.40
F4	86.83	730.10	118.30	74.71	0.50	2.45	0.49
F5	127.02	1008.35	165.99	109.45	0.52	2.89	0.44
F6	130.98	1004.96	179.52	114.09	0.46	3.00	0.47

图1是6架次飞机观测的平均 N_a 和 D_m 的垂直分布。由图1可见,大量气溶胶粒子集中在低层, N_a 随海拔高度升高急剧降低, N_a 在垂直方向上存在3个峰值:第1个峰值出现在800 m高度附近,峰值浓度为 $1110 cm^{-3}$;第2个峰值出现在2000 m高度附近,峰值浓度为 $689 cm^{-3}$;第3个峰值出现在2880 m高度附近,峰值浓度为 $471 cm^{-3}$ 。 N_a 在3800 m高度以下比3800 m以上高1个量级。但 D_m 垂直分布呈现完全不同的特征,在3500 m高度以下 D_m 分布相对稳定,平均值为 $0.23 \mu m$;3500 m高度以上, D_m 随高度增加增大,峰值出现在5370 m高度,峰值粒径为 $0.80 \mu m$ 。Li等^[4]分析2013年7月山西地区6次飞行个例的积聚模态气溶胶数浓度

的垂直廓线,发现从地面到1200 m高度, N_a 随高度逐渐增大,1200 m高度以上 N_a 随高度急剧降低, N_a 第1个峰值出现在1000~1400 m高度,第2个峰值出现在2000 m高度附近。平均 N_a 垂直分布特征均表现出随高度增加而递减的趋势,峰值位置存在差异,气溶胶粒子峰值直径出现的高度基本相同。

气溶胶垂直廓线与温度、相对湿度等气象要素的垂直分布密切相关^[37-38],本文选取F3(起飞过程)和F4(起飞过程和降落过程)共3次在晴空云外的垂直探测数据,分析大气层结对气溶胶垂直分布的影响。由图2a温度廓线可以看到,本次探测无明显逆温, N_a 从低空到高空呈线性递减分布,由图3a温

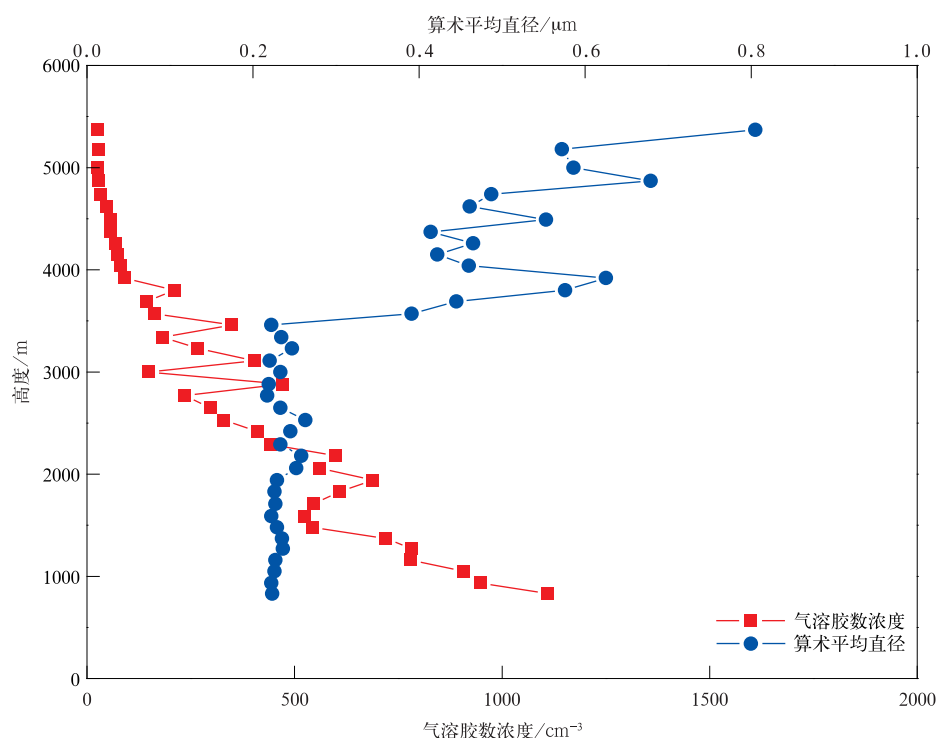


图1 平均气溶胶数浓度和算术平均直径的垂直分布

Fig. 1 Vertical distributions of N_a and D_m

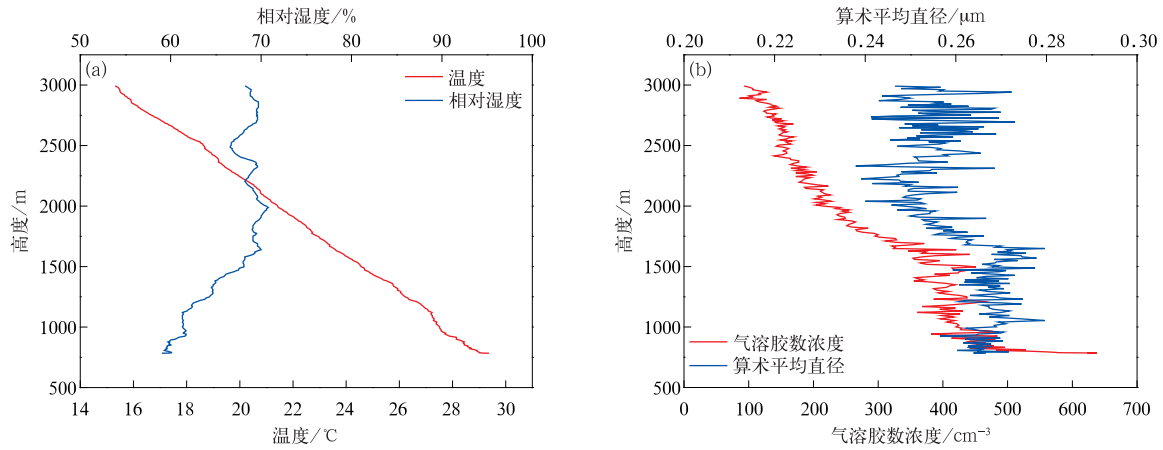


图2 2018年7月31日F3观测的温湿廓线(a)和气溶胶数浓度、算术平均直径的垂直分布(b)
Fig.2 Vertical distributions of temperature and relative humidity(a), N_a and D_m (b) during F3 on 31 Jul 2018

度廓线可见,1300 m 高度、2000 m 高度和 2500 m 高度出现逆温,图 3c 温度廓线显示在 1300 m 高度

和 2300 m 高度出现逆温,对应图 3b 和图 3d 中 N_a 在逆温高度出现明显累积,说明逆温层的存在阻挡

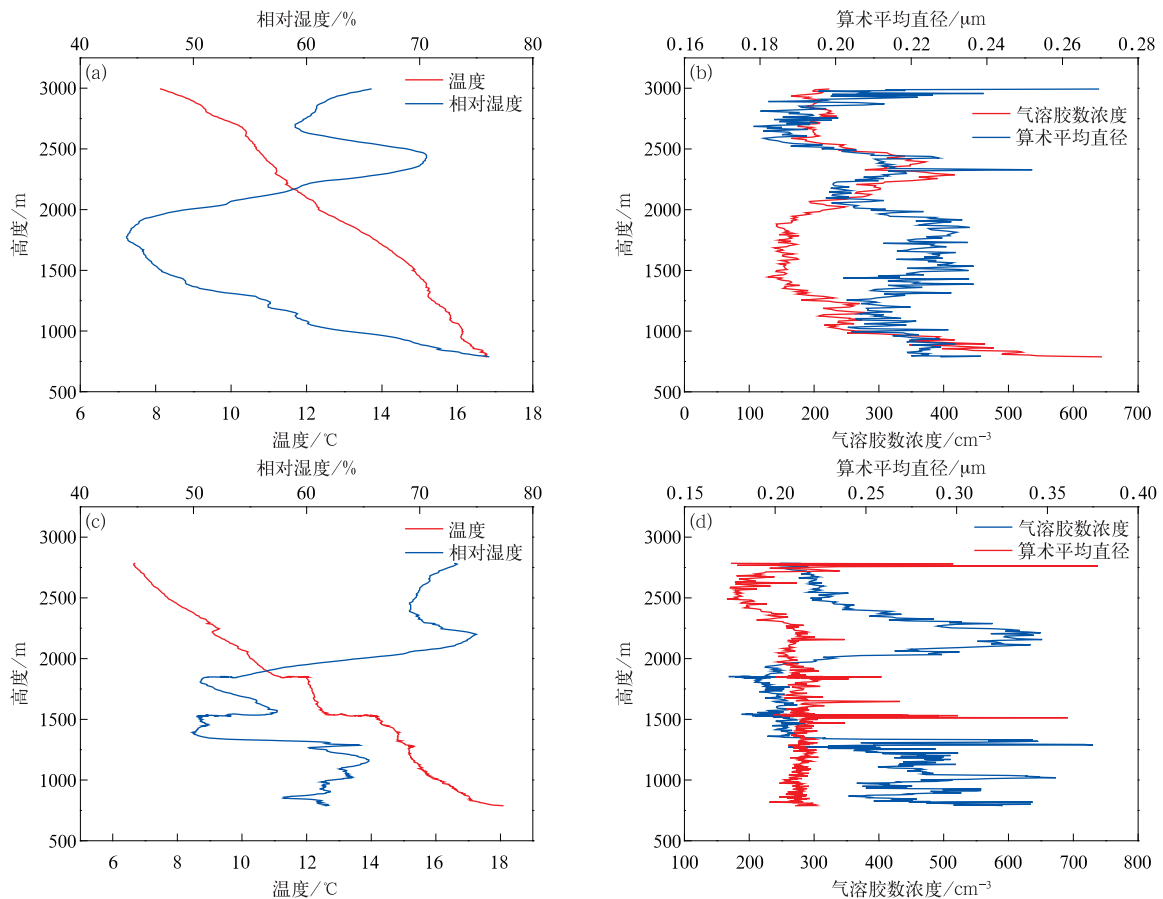


图3 2018年8月22日F4两次垂直观测的温湿廓线及气溶胶数浓度、算术平均直径的垂直分布

(a)起飞过程温湿廓线,(b)起飞过程 N_a 和 D_m 垂直分布,

(c)降落过程温湿廓线,(d)降落过程 N_a 和 D_m 垂直分布

Fig.3 Vertical distributions of temperature,relative humidity, N_a and D_m during F4 on 22 Aug 2018

(a)temperature,relative humidity during take off,(b) N_a and D_m during take off,

(c)temperature,relative humidity during landing,(d) N_a and D_m during landing

气溶胶的垂直输送。对比湿度廓线与 D_m 关系可以看到,低空(2000 m 高度以下) D_m 和相对湿度无明显相关性,高空(2000 m 高度以上) D_m 和相对湿度变化较一致,高值区域基本吻合,说明低层气溶胶来源受人类活动影响较多,气溶胶种类较为复杂,而高层气溶胶来源较为单一,气溶胶粒子存在明显的吸湿增长。

为了分析不同高度气溶胶粒子的水平分布特

征,2018年7月26日开展4个不同高度的飞行探测(F2),图4为当日 N_a 和 D_m 在1880,2200,3100 m 和3400 m 高度的水平分布特征。相对于垂直变化特征, N_a 和 D_m 的水平变化幅度较小,统计4个高度处 N_a , D_m , 温度和相对湿度的平均值和标准差可知, N_a 随高度升高而减小, D_m 在3500 m 高度以下较为稳定,且探测期间 D_m 平均值较小。

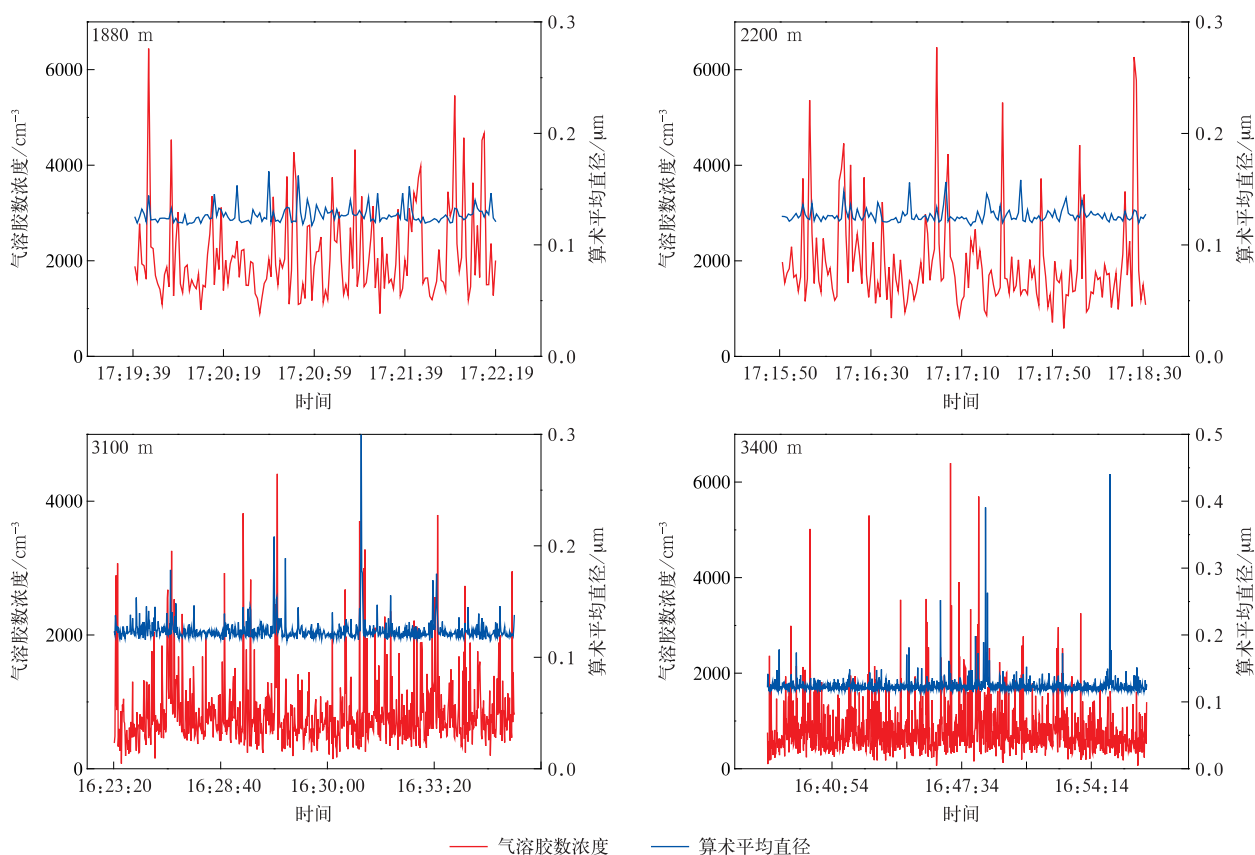


图4 2018年7月26日F2观测不同高度的气溶胶数浓度和算术平均直径的水平分布

Fig. 4 Horizontal distributions of N_a and D_m during F2 on 26 Jul 2018

2.2 气溶胶粒子谱分布特征

大气气溶胶包含多种不同尺度不同成分的粒子,粒子谱分布是描述气溶胶粒子分布的重要物理量,决定气溶胶在大气中传输、寿命以及光学特性。本文6个架次观测的气溶胶粒子谱分布如图5所示,6架次探测的气溶胶粒子谱分布较为一致,均呈多峰分布,峰值位置相近,气溶胶粒子主要集中在小粒子端,大粒子端 N_a 较小。

图6为6架次飞机观测的气溶胶粒子平均谱分布和用对数正态分布公式拟合的特征曲线。由图6

可知,气溶胶平均谱分布呈三峰分布,第1个峰值位于第1模式,峰值直径为 $0.11 \mu\text{m}$,第2个峰值位于第2模式,峰值直径为 $0.24 \mu\text{m}$,第3个峰值位于第3模式中,峰值直径可能大于 $3 \mu\text{m}$,由于PCASP-100X量程的限制,不能确定峰值直径的位置;第1模式和第2模式气溶胶粒子数浓度随高度明显减小。气溶胶粒子平均谱分布特征参数可为改善区域气候模式、气溶胶-云模式等参数化方案提供重要的原位测量依据。

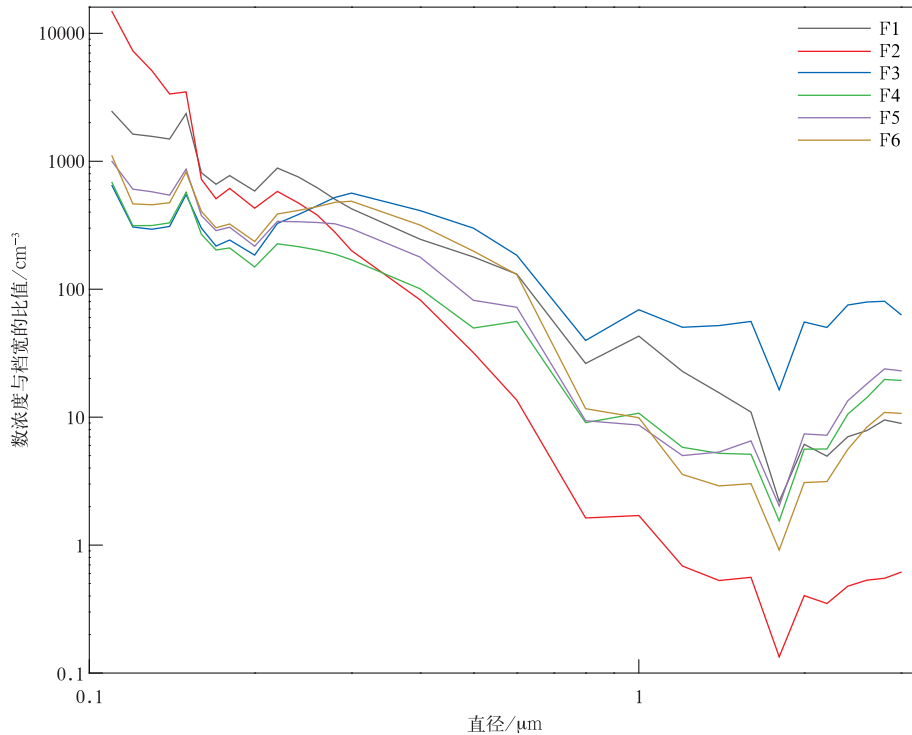


图5 6架次飞机观测的气溶胶粒子谱分布

Fig. 5 Distributions of aerosol particles during six flights

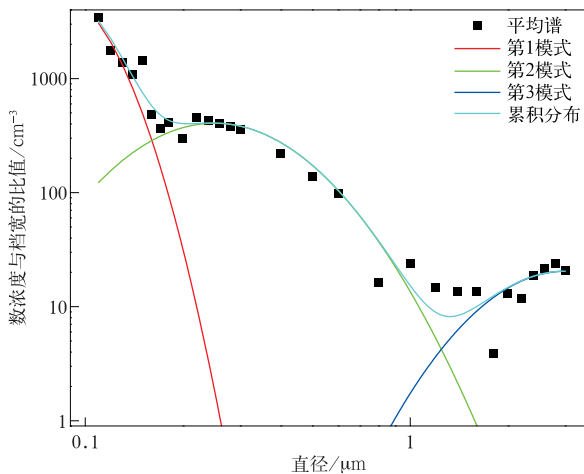


图6 6架次飞机观测的气溶胶粒子平均谱分布

Fig. 6 Mean size distributions of aerosol particles during six flights

2.3 云垂直分布特征

图7为6架次飞行上升或下降穿云过程中云滴数浓度(N_c)和液态水含量(L)的变化。由图7可见,F2穿过的3层云均较薄,其余架次飞机穿过的云层较厚, L 和 N_c 的变化趋势较一致。6架次飞行观测中云底高度为1217~3498 m,云顶高度为3753~5686 m。 N_c 最大值为813.12 cm^{-3} ,出现在2018年7月26日(F2), L 最大值为1.57 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,出现

在7月31日(F3)。F1~F3架次飞行期间云中 L 相对较高, L 与垂直气流的强度有关,上升气流区与高 L 区基本一致^[39],说明F1~F3观测期间云中上升气流强,且F1和F3观测期间 L 起伏变化较大,说明云中乱流较明显,F4~F6观测期间 L 小且变化幅度小,云中气流比较稳定。综合分析6架次穿云过程可知,低层云中 N_c 较大, L 较小,中层和高层云中 N_c 较小, L 较大,说明低层云中云滴尺度较小,中层和高层云中云滴尺度较大。

2.4 云微物理参量特征

以F3为例研究云微物理特征。F3观测期间有9次穿云过程,图8为观测期间飞行高度、 N_c 和 L 的时间序列,同时满足 N_c 大于10 cm^{-3} , L 大于0.001 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 两个条件,持续时间超过5 s时判定为云。飞机在起飞6 min后上升至4000 m高度以上,持续飞行56 min后开始下降。

图9为云朵I~IX的云滴谱分布特征,其中云朵I、云朵II和IX的云滴谱较窄,约为20 μm 。云朵III~VIII的云滴谱宽为50 μm ,且基本呈单峰型分布,在9~16 μm 达到峰值。Lü等^[40]研究东北地区清洁和污染条件的云滴尺度分布特征,本研究中的云滴数浓度与其污染条件下的结果相似。

图10为 N_c , L 和云滴有效半径(R_e)的概率密

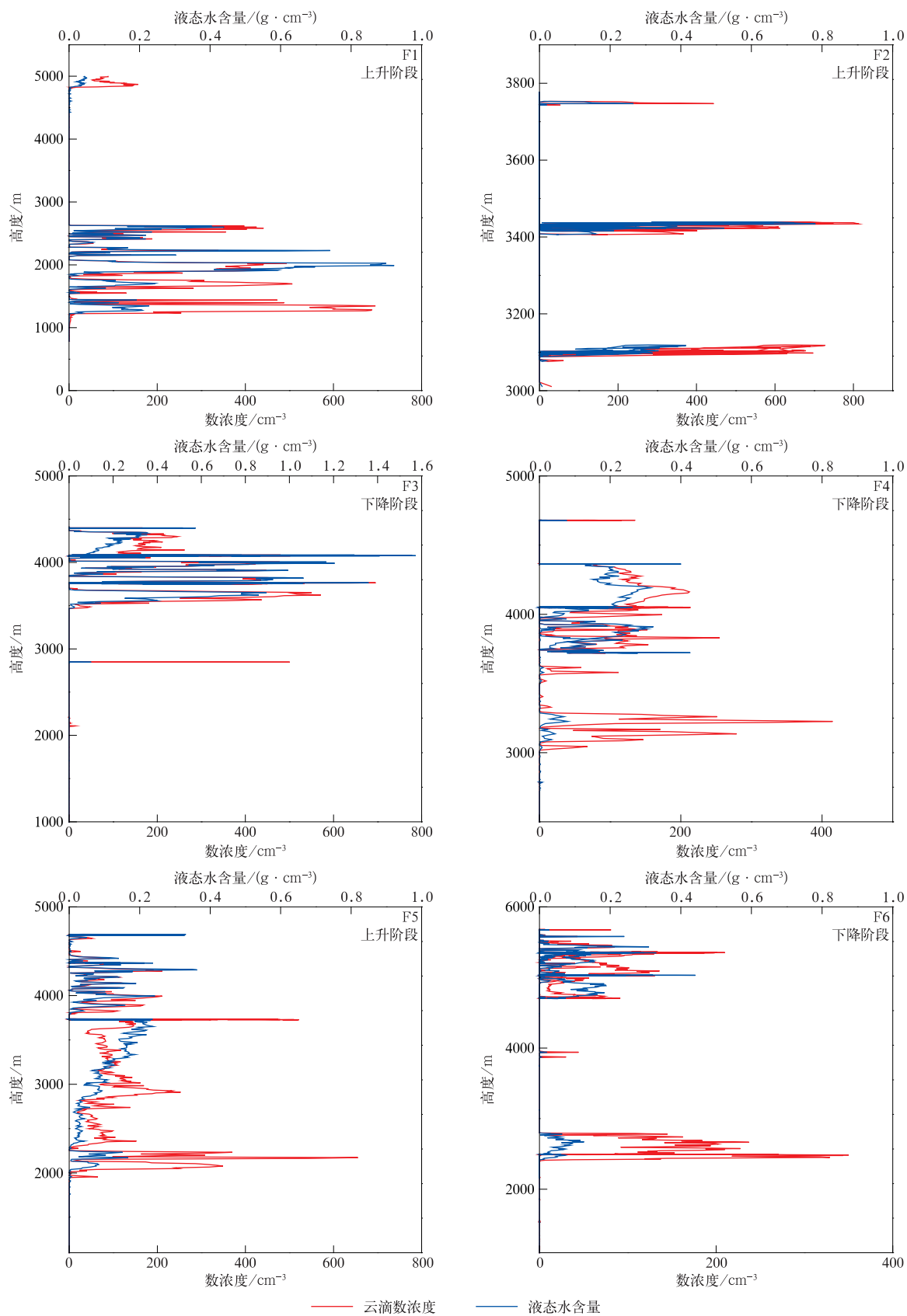


图 7 F1~F6 观测的云滴数浓度和液态水含量垂直廓线
 Fig. 7 Vertical distributions of N_c and L during F1-F6

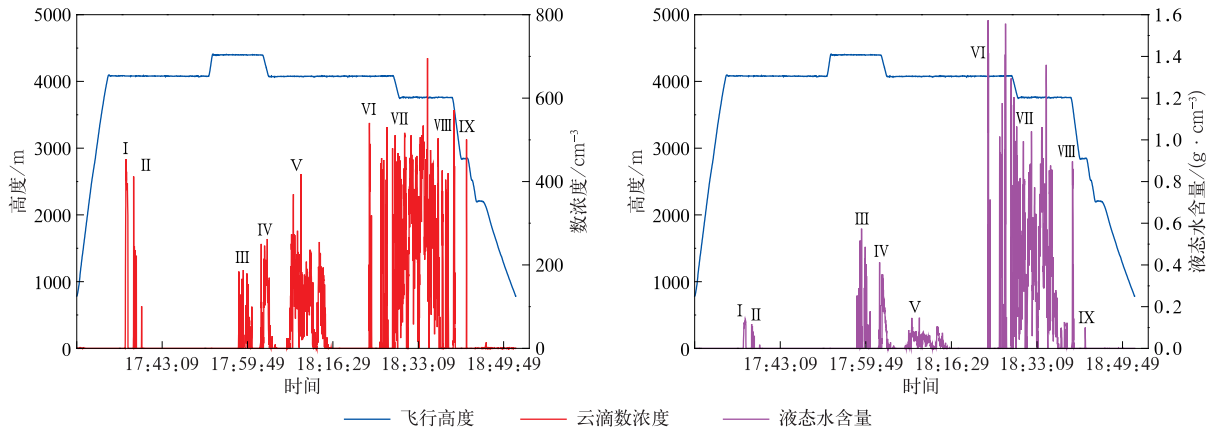


图8 F3穿云期间的飞行高度、云滴数浓度和液态水含量(9朵云用I~IX表示)
 Fig. 8 Time series of N_c and L during F3(the nine clouds are marked by I - IX)

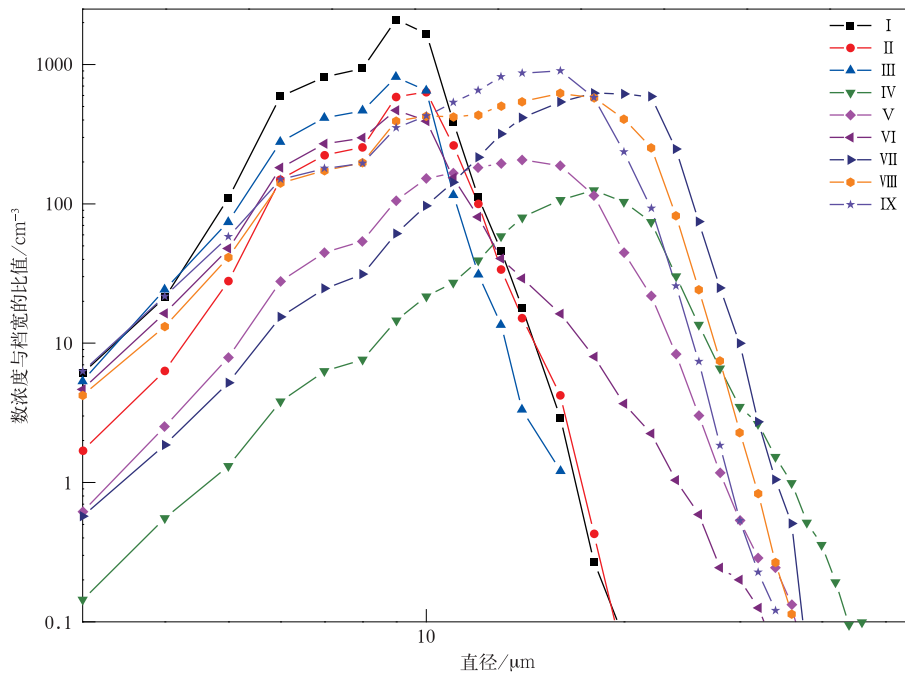


图9 云朵I~IX的云滴谱
 Fig. 9 Cloud droplet size distributions for cloud I - IX

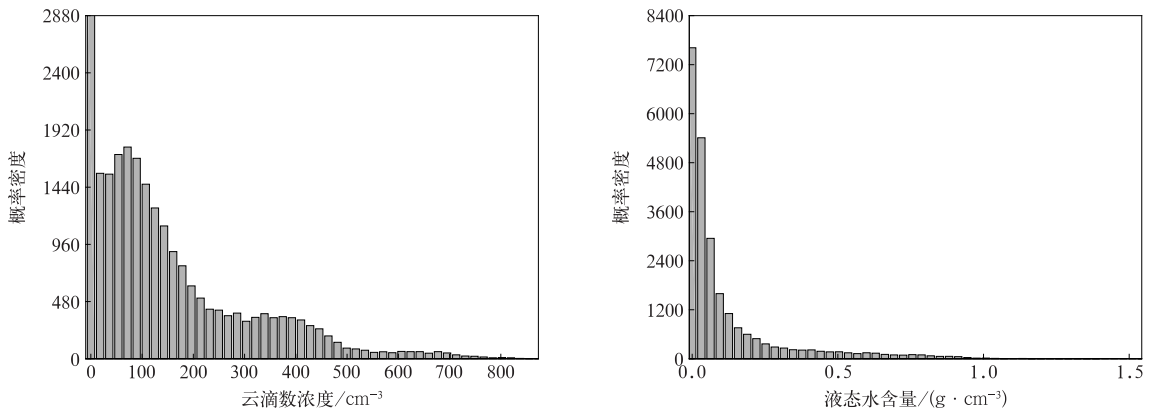
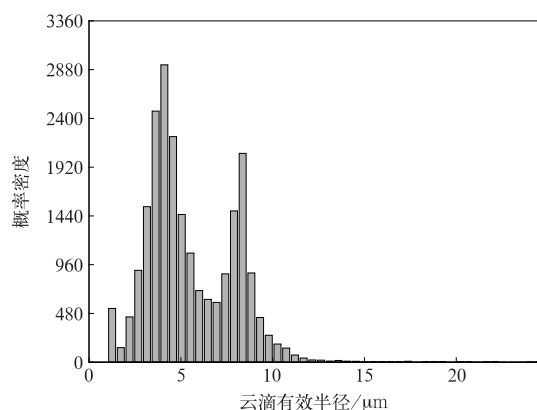


图10 云滴数浓度、液态水含量和云滴有效半径概率密度函数
 Fig. 10 The probability distribution functions of N_c , L and R_c



续图 10

度函数。 N_c 的平均值为 150.94 cm^{-3} , 最大值为 873.32 cm^{-3} , 概率密度函数为双峰分布, 两个峰值处 N_c 分别为 8.33 cm^{-3} 和 72.33 cm^{-3} , 均处在概率分布函数的低值区。 L 的平均值为 $0.11 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值为 $1.54 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 概率密度函数为单峰分布, 峰值处 L 为 $0.015 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 处在概率分布函数低值区。 R_c 平均值为 $5.52 \mu\text{m}$, 最大值为 $24.49 \mu\text{m}$, 概率密度函数为双峰分布, 两个峰值处 R_c 浓度分别为 $4.24 \mu\text{m}$ 和 $8.38 \mu\text{m}$, 均处在概率分布函数的低值区。本研究中 N_c , L 和 R_c 的概率密度函数显示的特征与 Yang 等^[34] 对华中地区的研究及 Zhao 等^[41] 对华北地区的研究结果均有所不同。

3 结 论

本研究基于 2018 年 7—8 月华北中部地区 6 架次飞机观测数据, 分析气溶胶和云滴的垂直和水平分布特征。得到以下结论:

1) 华北中部 780~5687 m 高度内 N_a 平均值为 821.36 cm^{-3} , 最大量级可达到 10^4 cm^{-3} , N_{acc} 占总颗粒浓度的 80% 以上, 表明细颗粒占大多数, D_m 平均值为 $0.12 \sim 0.52 \mu\text{m}$ 。

2) 6 架次飞机观测的平均 N_a 随高度增加递减, 天气条件为中高层云时 N_a 高于天气条件为中低层云时, D_m 在 3500 m 高度以下分布相对稳定, 平均值为 $0.23 \mu\text{m}$; 3500 m 高度以上随高度增加而增大; 大气层结状态对气溶胶分布影响较大, 逆温层对气溶胶垂直输送有明显的阻挡作用, 逆温层处出现气溶胶粒子的累积, 相对湿度对高空(2000 m 高度以上) D_m 的垂直分布影响较大。

3) 低层云中 N_c 较大、 L 较小, 而中、高层云中

N_c 较小、 L 较大。

4) 观测期间气溶胶粒子谱均呈现多峰型分布, 平均气溶胶谱呈三峰分布; 云滴谱宽多为 $50 \mu\text{m}$ 左右, 且基本呈现单峰型分布, 在 $9 \sim 16 \mu\text{m}$ 达到峰值; N_c 和 R_c 的概率密度函数均为双峰型分布, L 的概率密度函数为单峰型分布。

参 考 文 献

- [1] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 2002, 294(5549): 2119-2124.
- [2] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. Indian Ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J Geophys Res Atmos*, 2001, 106(D22): 28371-28398.
- [3] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Li J X, Yin Y, Li P R, et al. Aircraft measurements of the vertical distribution and activation property of aerosol particles over the Loess Plateau in China. *Atmos Res*, 2015, 155: 73-86.
- [5] 梁苑新, 车慧正, 王宏, 等. 北京一次污染过程气溶胶光学特性及辐射效应. *应用气象学报*, 2020, 31(5): 583-594. Liang Y X, Che H Z, Wang H, et al. Aerosol optical properties and radiative effects during a pollution episode in Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 583-594.
- [6] 杨先逸, 车慧正, 陈权亮, 等. 天空辐射计观测反演北京城区气溶胶光学特性. *应用气象学报*, 2020, 31(3): 373-384. Yang X Y, Che H Z, Chen Q L, et al. Retrieval of aerosol optical properties by skyradiometer over urban Beijing. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 373-384.
- [7] Han Z, Montague D C, Snider J R. Airborne measurements of aerosol extinction in the lower and middle troposphere over Wyoming, USA. *Atmos Environ*, 2003, 37(6): 789-802.
- [8] Li J X, Li P R, Ren G, et al. Aircraft measurements of aerosol distribution, warm cloud microphysical properties, and their relationship over the Eastern Loess Plateau in China. *Tellus Ser B, Chem Phys Meteor*, 2019, 71(1): 1-18.
- [9] Chen X T, Kang S C, Yang J H, et al. Investigation of black carbon climate effects in the Arctic in winter and spring. *Sci Total Environ*, 2020, 751: 142-145.
- [10] Liu Q, Jia X C, Quan, J N, et al. New positive feedback mechanism between boundary layer meteorology and secondary aerosol formation during severe haze events. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 6095.
- [11] 肖辉, 舒未希, 付丹红, 等. 声波对气溶胶和云雾粒子聚并影响研究进展. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 257-271. Xiao H, Shu W X, Fu D H, et al. A review on the effect of sound waves upon the coalescence of aerosol and cloud and fog particles. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 257-271.

- [12] Zhang W J, Zhang X Y, Zhong J T, et al. The effects of the "two-way feedback mechanism" on the maintenance of persistent heavy aerosol pollution over areas with relatively light aerosol pollution in northwest China. *Sci Total Environ*, 2019, 688: 642-652.
- [13] 李东宸, 林慈哲, 银燕. 强对流天气对 O₃ 和 CO 的垂直输送作用. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 82-92.
Li D C, Lin C Z, Yin Y. The vertical transport of the ozone and carbon monoxide by severe convective weather. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(1): 82-92.
- [14] 王簧, 李英, 文永仁. 川藏高原一次混合型强对流天气的观测特征. *应用气象学报*, 2021, 32(5): 567-579.
Wang H, Li Y, Wen Y R. Observational characteristics of a hybrid severe convective event in the Sichuan-Tibet Region. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(5): 567-579.
- [15] 矫健, 贾小芳, 颜鹏, 等. 2016—2017 年中国中东部本底地区 PM₁₀ 化学特性. *应用气象学报*, 2021, 32(1): 65-77.
Jiao J, Jia X F, Yan P, et al. Chemical characteristics of PM₁₀ at background stations of central and eastern China in 2016—2017. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(1): 65-77.
- [16] Wang Y, Khalizov A, Levy M, et al. New directions: Light absorbing aerosols and their atmospheric impacts. *Atmos Environ*, 2013, 81: 713-715.
- [17] 段婧, 楼小凤, 陈勇, 等. 基于航测的珠三角气溶胶垂直分布及活化特性. *应用气象学报*, 2019, 30(6): 677-689.
Duan J, Lou X F, Chen Y, et al. Aircraft measurements of aerosol vertical distributions and its activation efficiency over the Pearl River Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 677-689.
- [18] 杨怡曼, 周毓荃, 蔡兆鑫. 气溶胶垂直分布及活化特性的飞机观测个例研究. *气象*, 2020, 46(9): 1199-1209.
Yang Y M, Zhou Y Q, Cai Z X. A case study of aircraft observation of aerosol vertical distribution and activation characteristics. *Meteor Mon*, 2020, 46(9): 1199-1209.
- [19] 沙桐, 马晓燕, 银燕, 等. 石家庄地区气溶胶和 CCN 垂直廓线的飞机观测分析. *大气科学学报*, 2019, 42(4): 521-530.
Sha T, Ma X Y, Yin Y, et al. Aircraft measurements and analysis of the vertical distribution of aerosol particles and CCN over the Shijiazhuang area. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(4): 521-530.
- [20] 游积平, 高建秋, 黄梦宇, 等. 珠江三角洲地区大气气溶胶特征的飞机观测分析. *热带气象学报*, 2015, 31(1): 71-77.
You J P, Gao J Q, Huang M Y, et al. Analysis of the characteristics of the aircraft-observed atmospheric aerosols in Pearl River Delta. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(1): 71-77.
- [21] 范焯, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 49-62.
Fan Y, Guo X L, Fu D H, et al. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(1): 49-62.
- [22] 胡向峰, 秦彦硕, 段英, 等. 基于航测数据的河北中南部雾霾天气气溶胶及云凝结核研究. *干旱气象*, 2016, 34(3): 481-493.
Hu X F, Qin Y S, Duan Y, et al. Aircraft study of aerosol and CCN under foggy/hazy weather condition in autumn over the central and southern Hebei. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(3): 481-493.
- [23] Liu P F, Zhao C S, Zhang Q, et al. Aircraft study of aerosol vertical distributions over Beijing and their optical properties. *Tellus Ser B, Chem Phys Meteor*, 2009, 61(5): 756-767.
- [24] 石立新, 段英. 华北地区云凝结核的观测研究. *气象学报*, 2007, 65(4): 644-652.
Shi L X, Duan Y. Observations of cloud condensation nuclei in North China. *Acta Meteor Sinica*, 2007, 65(4): 644-652.
- [25] 孙霞, 银燕, 韩洋, 等. 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1165-1170.
Sun X, Yin Y, Han Y, et al. Distribution of cloud particles and cloud condensation nuclei during haze/fog events in Shijiazhuang. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1165-1170.
- [26] 孙玉稳, 孙霞, 银燕, 等. 华北平原湿地上空气溶胶的分布特征研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(增刊 I): 96-101.
Sun Y W, Sun X, Yin Y, et al. Aerosol distribution over wetlands on north China Plain. *Journal of Lanzhou University (Nat Sci Ed)*, 2010, 46(Suppl I): 96-101.
- [27] 李军霞, 银燕, 李培仁, 等. 山西夏季气溶胶空间分布飞机观测研究. *中国环境科学*, 2014, 34(8): 1950-1959.
Li J X, Yin Y, Li P R, et al. Aircraft measurements of aerosol spatial distribution properties in Shanxi Province in summer. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 1950-1959.
- [28] 栾天, 郭学良, 张天航, 等. 不同降水强度对 PM_{2.5} 的清除作用及影响因素. *应用气象学报*, 2019, 30(3): 279-291.
Luan T, Guo X L, Zhang T H, et al. The scavenging process and physical removing mechanism of pollutant aerosols by different precipitation intensities. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(3): 279-291.
- [29] 梁智豪, 王东海, 梁钊明. 探空观测的边界层高度时空变化特征. *应用气象学报*, 2020, 31(4): 447-459.
Liang Z H, Wang D H, Liang Z M. Spatio-temporal characteristics of boundary layer height derived from soundings. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 447-459.
- [30] 闫世明, 王雁, 郭伟, 等. 太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析. *环境科学*, 2019, 40(11): 4801-4809.
Yan S M, Wang Y, Guo W, et al. Characteristics, transportation, pathways, and potential sources of air pollution during autumn and winter in Taiyuan. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 4801-4809.
- [31] 李义宇, 杨鸿儒, 王楠, 等. 太原市一次重污染天气过程的成因分析. *气象与环境学报*, 2018, 34(2): 11-18.

- Li Y Y, Yang H R, Wang N, et al. Formation analysis of a severe air pollution event in Taiyuan. *Journal Meteorology and Environment*, 2018, 34(2): 11-18.
- [32] Bai X Y, Tian H Z, Liu X Y, et al. Spatial-temporal variation characteristics of air pollution and apportionment of contributions by different sources in Shanxi province of China. *Atmos Environ*, 2021, 244, 117926.
- [33] Kleinman L I, Daum P H, Lee Y N, et al. Aerosol concentration and size distribution measured below, in, and above cloud from the DOEG-1 during VOCALS-REx. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12(1): 207-223.
- [34] Yang J M, Li J X, Li P R, et al. Spatial distribution and impacts of aerosols on clouds under Meiyu frontal weather background over central China based on aircraft observations. *J Geophys Res Atmos*, 2020, 125(15), e2019JD031915.
- [35] Hao J, Yin Y, Kuang X, et al. Aircraft measurements of the aerosol spatial distribution and relation with clouds over eastern China. *Aerosol Air Qual Res*, 2017, 17(12): 3230-3243.
- [36] Sun X, Yin Y, Sun W Y, et al. Seasonal and vertical variations in aerosol distribution over Shijiazhuang, China. *Atmos Environ*, 2013, 81: 245-252.
- [37] Johnson D W, Osborne S, Wood R, et al. Observations of the evolution of the aerosol, cloud and boundary-layer characteristics during the 1st ACE-2 Lagrangian experiment. *Tellus Ser B Chem Phys Meteor*, 2016, 52(2): 348-374.
- [38] 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 Environ Sci*, 2015, 34(8): 44-56.
- [39] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989. Wang P F, Li Z H. *Microscopic Cloud Physics*. Beijing: China Meteorological Press, 1989.
- [40] Lü Y H, Lei H, Yang J. Aircraft measurements of cloud-aerosol interaction over East Inner Mongolia. *Adv Atmos Sci*, 2017, 34(8): 983-992.
- [41] Zhao C F, Qiu Y M, Dong X B, et al. Negative aerosol-cloud relationship from aircraft observations over Hebei, China. *Earth and Space Science*, 2018, 5(1): 19-29.

Characteristics of Aerosol and Cloud over the Central Plain of North China in Summer

Li Yiyu¹⁾ Sun Hongping¹⁾ Yang Junmei¹⁾ Ren Gang¹⁾ Zhao Delong²⁾ Zhou Wei²⁾ Liu Zhichao³⁾

¹⁾ (Shanxi Weather Modification Center, Taiyuan 030002)

²⁾ (Beijing Weather Modification Center, Beijing 100089)

³⁾ (Flight Control Room, Unit 95820 of the PLA, Beijing 102207)

Abstract

The vertical distribution of aerosols and clouds is a key issue in the indirect climate effects of aerosols. Based on the aerosol and cloud droplet number concentration data observed by 6 aircrafts over the central plain of North China from July to August in 2018, the vertical distribution and spectral characteristics of aerosols and clouds are studied. The results show that the mean value of aerosol number concentration (N_a) of this area is higher than that in Central China, the in-cloud aerosol number concentration (N_{acc}) accounts for over 80% of the total concentration, and the mean particle diameter (D_m) is between 0.12 and 0.52 μm , which means fine particles contribute the largest proportion. The aerosol number concentration decreases with the height. The total aerosol number concentration is higher with middle and high stratus comparing to low-level stratus. The vertical distribution of N_a is significantly affected by atmospheric stratification, as inversion temperature layer block the vertical transport of aerosols. The vertical distribution of mean diameter below 3500 m is relatively stable, with an average of 0.23 μm , while increases with the height above 3500 m. The vertical distribution of aerosol particle mean diameter at high altitude (above 2000 m) is greatly affected by relative humidity. Compared with the vertical distribution of aerosol number concentration and mean diameter, the horizontal variety is smaller. In low-level stratus, the cloud droplet number concentration (N_c) is large, and the liquid water content (L) is small. In middle and high stratus, the cloud droplet number concentration is small, and the liquid water content is large. The probability distribution function of cloud droplet number concentration and liquid water content are bimodal distribution, and the probability distribution function of cloud droplet effective radius (R_e) show a single mode. The distribution of aerosol number concentration spectrum shows multi-peak distribution, and the average aerosol spectrum show three-peak distribution. The distribution of cloud droplet number concentration spectrum shows a single peak, which appears at the scale of 9–16 μm , and the spectral width of cloud droplets is 50 μm . The parameter characteristics of aerosol spectral distribution obtained by fitting aerosol spectral distribution can provide an important in situ measurement basis for improving the parameterized schemes such as regional climate model and aerosol-cloud model.

Key words: the central plain of North China; aerosol; cloud droplet; aircraft measurements