

文章编号: 2096-1618(2022)03-0333-11

基于飞机观测的四川盆地9月气溶胶粒子谱分析

王维佳^{1,2}, 李宏宇³

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 3. 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081)

摘要:基于飞机搭载的PMS(particle measuring system)系列机载粒子探头飞行观测数据的分析,获得了四川盆地尺度0.1~3.0 μm的气溶胶粒子数浓度的垂直分布及不同高度层的气溶胶粒子谱分布,并对粒子谱进行拟合分析。结果表明:四川盆地2010年9月4次飞行观测到的气溶胶粒子平均数浓度分别为210 cm⁻³、254 cm⁻³、163 cm⁻³、260 cm⁻³,与北京、石家庄飞机观测到的气溶胶数浓度量级相同。各高度上的气溶胶粒子平均直径均在0.13~0.22 μm,说明四川盆地9月气溶胶粒子大多为细粒子,呈现显著的城市工业气溶胶特征。气溶胶粒子谱呈单峰、双峰或三峰分布。总体上,随着海拔高度的增加,气溶胶浓度减小,粒子谱变窄,但高空有云出现时气溶胶浓度会有小幅度增大。四川盆地9月的气溶胶粒子谱满足Junge谱分布,利用三参数尺度谱拟合更接近飞机观测事实,但采用三参数对数正态分布谱拟合效果不好。

关键词:气溶胶; 粒子谱; 飞机观测; 四川盆地
中图分类号: P412.24 **文献标志码:** A
doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.03.014

0 引言

在气候系统中,气溶胶通过散射、吸收太阳短波辐射和地球长波辐射直接影响气候^[1],又可以作为云凝结核改变云的生命期和光学性质,对气候系统产生间接辐射强迫作用^[2]。IPCC第五次评估报告指出,总辐射强迫估算中的最大不确定性来源是气溶胶及其与云的相互作用。同时,气溶胶对降水的影响被认为是全球许多地方强降水增加弱降水和中等强度降水减少的主要原因^[3-4]。此外,人类活动产生的气溶胶粒子对空气质量造成了严重影响。一直以来,气溶胶研究的一个重要问题是数值模拟与观测事实之间存在较大误差。中国科学家在气溶胶的观测方面开展了许多基础研究工作,但是主要集中在研究气溶胶的辐射特性^[5-6],对气溶胶粒子谱了解较少。气溶胶粒子谱表征了气溶胶粒子的大小与数量之间的对应关系,不仅决定着气溶胶的光学和物理特性,而且影响气溶胶—云—辐射—降水过程的相互作用。因此,了解气溶胶粒子谱特征对于改进天气预报和数值模式有重要价值。由于缺乏观测数据的支持,对气溶胶粒子谱的特征了解不够。利用飞机搭载光学仪器在大气中直接观

测气溶胶可以获取连续的气溶胶粒子浓度和尺度数据,进而可以分析其粒子谱特征。马新成等^[7]利用2007-2009年的3次飞机观测数据分析了北京地区春季气溶胶分布特征,发现细粒子浓度主要分布在边界层内,随高度递减。范焯等^[8]利用2004年的8次飞机观测数据分析了北京地区夏季气溶胶分布特征,发现气溶胶浓度阴天最大,晴空最小,气溶胶粒子直径平均值集中在0.21~0.31 μm,气溶胶粒子谱型为单峰型。孙震等^[9]利用2006年和2007年的4次飞机观测数据分析了石家庄春季气溶胶分布特征,发现气溶胶粒子平均直径值为0.13~0.26 μm,细粒子谱在0.2 μm左右出现峰值,负幂指数对细粒子谱分布有较好的拟合效果。李军霞等^[10-11]利用2013年5月的6次飞机观测数据分析了山西地区春季气溶胶分布特征,并分析了不同浓度气溶胶下云的形成;利用2013年7-8月6次飞机观测数据分析了山西地区夏季气溶胶分布特征,并给出了不同高度层气溶胶粒子谱分布及三参数对数正态分布特征参数。

这些研究都是基于中国北方地区的气溶胶飞机观测结果得出的,中国南方地区在这方面的观测很有限,所以缺乏相关研究。由于地形因素、气象条件及密集的人口和工农业生产,四川盆地气溶胶的生成、扩散及集聚具有明显的地域特征^[12],处于青藏高原下游和长江流域上游的独特地理位置及高浓度的气溶胶使四川

收稿日期:2020-11-04

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019YJ0621);中国气象局云雾物理环境重点实验室开放课题资助项目(2017Z01610)

盆地的气溶胶对区域乃至全球的云和降水有着显著的影响。2010年在四川盆地上空利用美国 Particle Metrics Inc. (PMI)公司生产的PMS (particle measuring system)系列机载粒子测量系统设备实施了20次飞机观测,本文采用其中未受降水影响的4次飞行观测数据分析气溶胶的粒子数浓度和粒子谱分布,并通过拟合分析粒子谱为数值模式中气溶胶参数化方案的改进提供实测依据。

1 观测概况

2010年9月,在四川盆地上空利用Cheyenne(夏延)ⅢA飞机搭载PMS系列观测设备进行了多次飞行观测,其中9月10日、17日、26日、27日无降水,采用这4次未受降水影响的飞行观测数据进行分析。探测飞机搭载的散射探头有被动腔式气溶胶粒子谱探头(PCASP)和前向散射云粒子谱探头(FSSP),根据Mie散射理论依据散射光强的大小来测量粒子大小^[13]。这2个探头作为光学测量仪器搭载于飞机机翼下方,在飞行中连续观测,其测量不会干扰自然云降水过程或气溶胶与云、降水的相互作用。测量粒子大小时,PCASP是汇集所有方向的散射光,FSSP是使用前向散射光。PCASP探头观测尺度为 $0.1 \sim 3.0 \mu\text{m}$,分15个通道观测气溶胶粒子,这15个通道的中值直径分别是: $0.11 \mu\text{m}$ 、 $0.13 \mu\text{m}$ 、 $0.155 \mu\text{m}$ 、 $0.185 \mu\text{m}$ 、 $0.225 \mu\text{m}$ 、 $0.275 \mu\text{m}$ 、 $0.35 \mu\text{m}$ 、 $0.45 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.05 \mu\text{m}$ 、 $1.35 \mu\text{m}$ 、 $1.75 \mu\text{m}$ 、 $2.25 \mu\text{m}$ 、 $2.75 \mu\text{m}$,数据采样频次为 $1 \text{次} \cdot \text{s}^{-1}$ 。FSSP有4个量程,2010年9月的飞行观测中开启的是2#量程,可观测 $2.0 \sim 32.0 \mu\text{m}$ 的云粒子,其15个观测通道的中值直径分别是: $3.0 \mu\text{m}$ 、 $5.0 \mu\text{m}$ 、 $7.0 \mu\text{m}$ 、 $9.0 \mu\text{m}$ 、 $11.0 \mu\text{m}$ 、 $13.0 \mu\text{m}$ 、 $15.0 \mu\text{m}$ 、 $17.0 \mu\text{m}$ 、 $19.0 \mu\text{m}$ 、 $21.0 \mu\text{m}$ 、 $23.0 \mu\text{m}$ 、 $25.0 \mu\text{m}$ 、 $27.0 \mu\text{m}$ 、 $29.0 \mu\text{m}$ 、 $31.0 \mu\text{m}$,这2个探头的的数据采样频次都是 $1 \text{次} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时,飞机上还搭载温度仪、GPS定位系统等。这套

PMS机载粒子测量系统在中国多地进行过飞行观测采样数据稳定可靠,为分析云微物理结构、人工影响天气效果、气溶胶光学特性等研究提供了有力数据支撑^[14-16]。

已有的研究表明,四川盆地是中国气溶胶光学厚度大值中心^[17]。将4次飞行的航线和当月MODIS观测的气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness at $0.55 \mu\text{m}$, AOT)平均值绘制如图1所示。可见,四川盆地气溶胶光学厚度大,盆地内的气溶胶光学厚度大值中心位于川南城市群,盆地北部气溶胶光学厚度相对略小,盆地中部是四川盆地内的气溶胶光学厚度中值区,这与四川盆地工业和人口的集中分布程度相符合。同时,图1中气溶胶光学厚度大于1.2也有可能是由于大气因素中云对反演结果误差的影响造成的偏高反演值^[18]。探测飞机从机场起飞后,经过AOT($0.55 \mu\text{m}$) $0.6 \sim 0.8$ 的区域,先后前往AOT($0.55 \mu\text{m}$) $0.2 \sim 0.6$ 的四川盆地北部(9月10日、17日)和AOT($0.55 \mu\text{m}$) $0.6 \sim 1.0$ 的四川盆地中部(9月26日、27日)观测。具体的观测时间和宏观特征见表1。4次飞行时间都是2 h有余,从海拔高度496 m的广汉机场起飞,飞往盆地中部或盆地北部探测,有3次探测飞机穿越了 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 层。

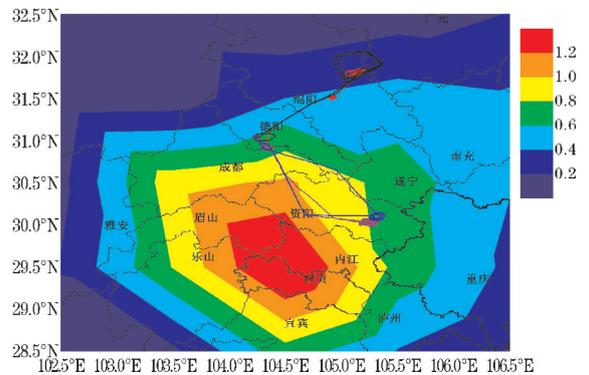


图1 MODIS $0.55 \mu\text{m}$ 通道观测的气溶胶光学厚度(填色)和飞行航线(气溶胶光学厚度为2010年9月的日平均值,红色航线为10日飞行航线,黑色航线为17日飞行航线,紫色航线为26日飞行航线,蓝色航线为27日飞行航线)

表1 飞行概况

日期	时间	海拔高度/m	温度/ $^\circ\text{C}$	$0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 层高度/m	探测范围	天气形势	天气现象
9月10日	17:33-19:31	496~6017	-5.0~25.8	4476	绵阳、德阳	高原切变线东移	阴天
9月17日	16:46-19:04	496~6050	-2.6~31.5	5747	绵阳、广元、德阳	副高西侧	多云间阴
9月26日	9:51-11:59	496~5966	-5.8~22.3	4825	资阳、成都、德阳	副高外围西南气流	阴天
9月27日	9:51-11:25	496~4237	1.5~19.2	N/A	资阳、成都、德阳	副高外围西南气流	阴天

4次飞行的三维航迹如图2所示。可以发现,飞机从飞行本场起飞后,首先长距离飞行到盆地中部的资阳或盆地北部的绵阳,在长距离飞行的同时飞机逐渐爬升,到达重点观测区域,9月10日、17日、26日、27日观测中心点分别是105.13°E、31.81°N(绵阳市

梓潼县), 105.00°E、31.83°N(绵阳市梓潼县), 105.27°E、30.04°N(资阳市安岳县), 105.33°E、30.10°N(资阳市安岳县)后,从特定高度开始盘旋下降垂直分层观测,再返回飞行本场。

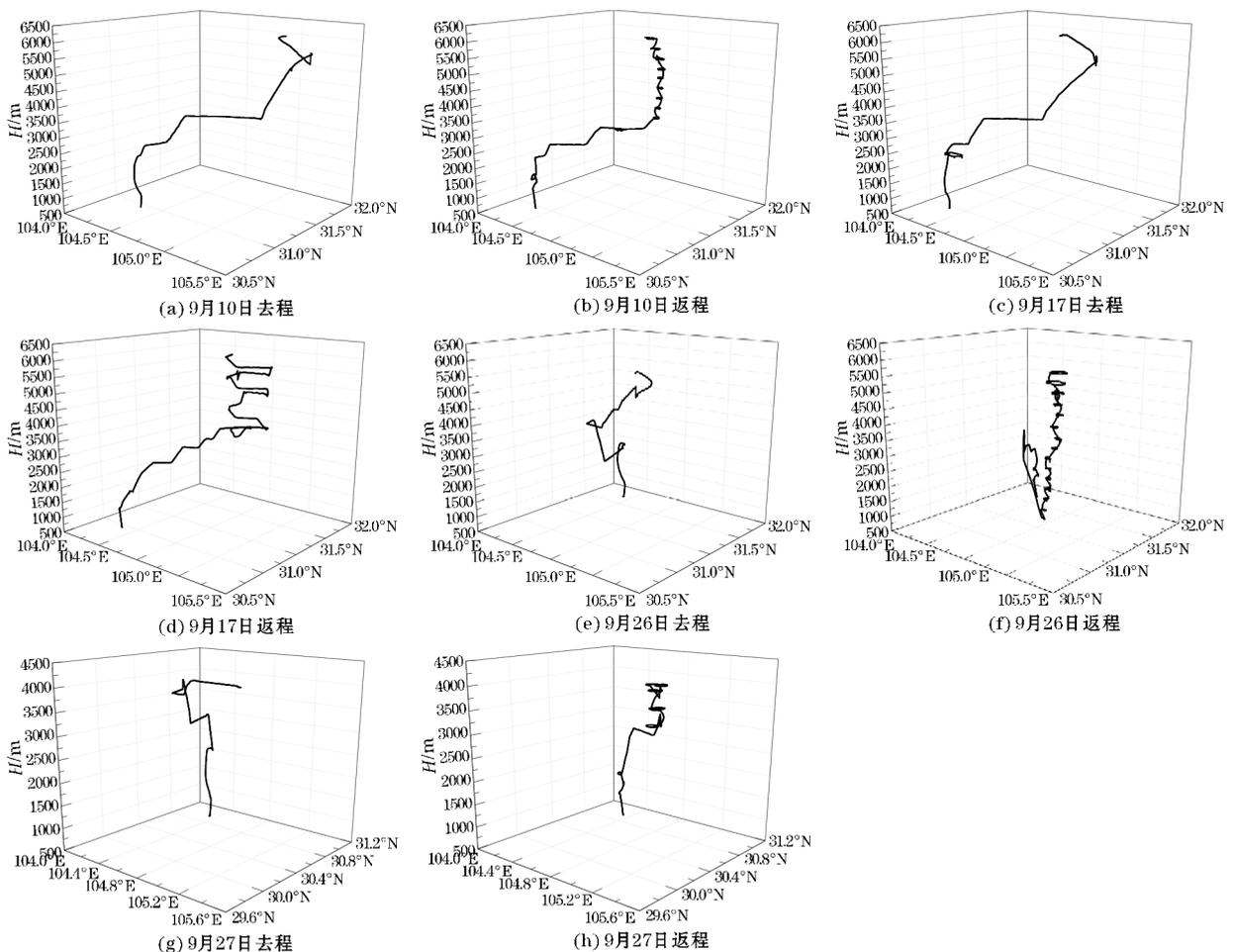


图2 观测飞行航迹

2 云粒子和气溶胶粒子数浓度

气溶胶粒子浓度随高度的分布如图3所示,图3中气溶胶数浓度已按每50 m高度范围取平均值,并绘出气溶胶数浓度均方差。总体上,气溶胶粒子浓度随高度减小,说明气溶胶主要来源于地面。地面附近的低层气溶胶粒子浓度很高,越往高层,气溶胶粒子向上输送强度越小,受重力沉降作用移出大气越多的气溶胶粒子越多。4次飞行观测到的气溶胶粒子数浓度最大值分别为 9733 cm^{-3} 、 5274 cm^{-3} 、 4855 cm^{-3} 、 3766 cm^{-3} 。气溶胶粒子浓度随着海拔高度的增加而减少的幅度与观测当日的大气边界层结构有关。已有的研究表明,大气边界层内温度的层结和湍流的强弱也影响着大气

污染物的垂直混合能力^[19-20]。这4次观测,地面气温较高,气温垂直递减,对流有发展,气溶胶粒子从地面向上的输送没有受到强的屏障,其中9月17日观测到的气溶胶粒子在中低层混合较均匀,湍流混合作用使大量气溶胶粒子由地面向上传输到较高的高度(约3350 m)并充分混合,中低层的气溶胶粒子浓度都达到 10^3 cm^{-3} 的量级。9月27日观测到的气溶胶粒子在近地面附近累积,并在725 m附近达到峰值,725~1000 m气溶胶粒子浓度随高度减小,在1000~1300 m高度上气溶胶粒子出现新的增长,而在这一高度上并没有发现逆温或者是云的影响,气溶胶粒子的增长可能来自其他地区的污染物排放远距离输送,1300~2500 m高度上气溶胶粒子混合较均匀,2500 m高度以下的气溶胶粒子浓度都达到 10^3 cm^{-3} 的量级。而9月

10日、9月26日这两次观测到中层的气溶胶粒子明显少于低层的气溶胶粒子,同时从低层到中层的过渡高度层内气溶胶粒子浓度大量减少,从 10^3 cm^{-3} 的量级减少到了 10^2 cm^{-3} 的量级。而在高空(9月10日是在5500 m以上,9月26日是在4200 m以上)又出现了气溶胶粒子浓度的小幅度增大,这可能与飞行观测时空高空入云,部分气溶胶粒子在云中活化为云凝结核并发生凝结增长等微物理过程有关。还发现4次观测中有

些高度上出现气溶胶数浓度均方差较大的情况,说明在这些高度上气溶胶粒子浓度水平差异大,结合飞行航迹(图2)分析,由于下垫面和人类活动、云区等局地因素对气溶胶水平分布特征有较大影响^[9],在飞机长距离平飞阶段,气溶胶粒子采样的地理位置跨度大,局地排放源和云区分布的不均匀性就造成了气溶胶浓度水平方向上的明显差异。

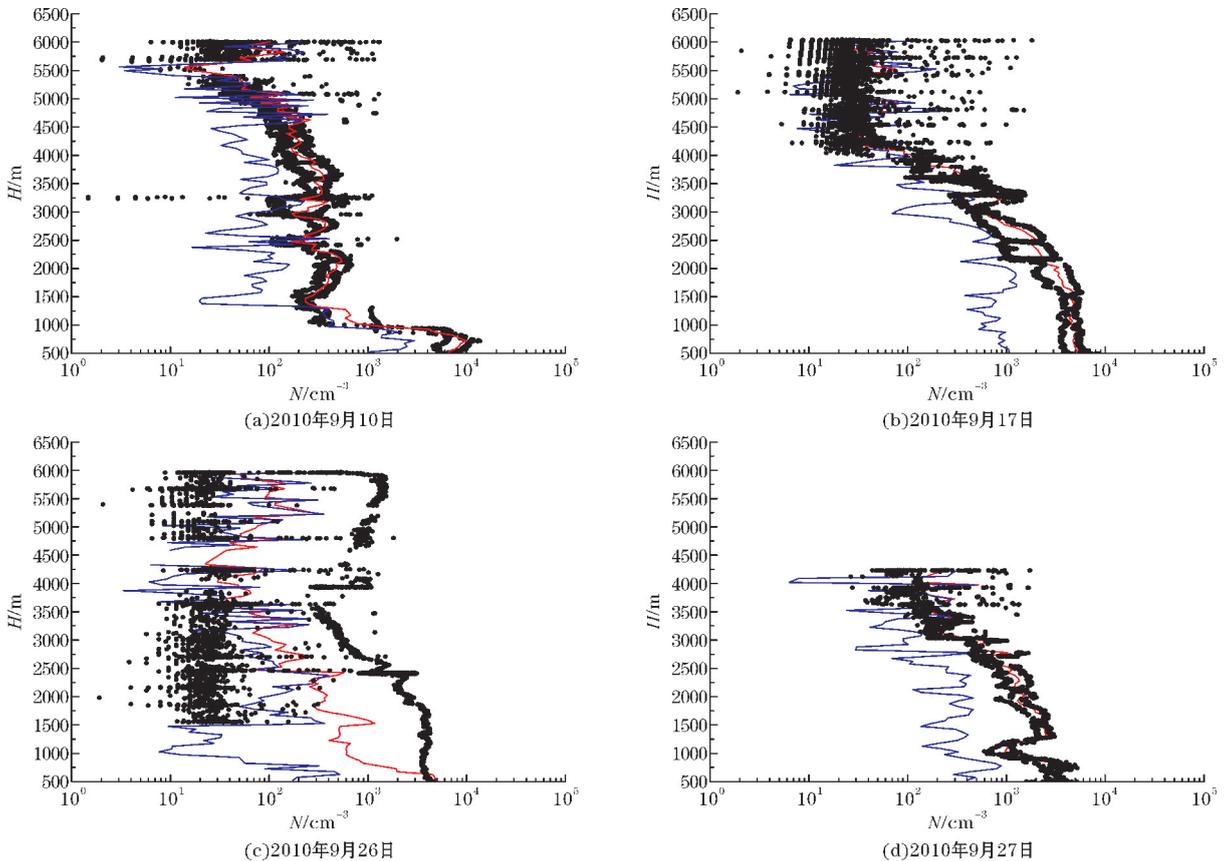


图3 气溶胶粒子数浓度垂直分布

(图中散点为气溶胶粒子数浓度,红色线为已按照每50 m高度取平均值处理的气溶胶粒子数浓度,蓝色线为气溶胶粒子数浓度均方差)

在云内,气溶胶粒子会作为云凝结核发生凝结增长等微物理过程,同时云内大气条件的变化也会对气溶胶粒子的吸湿、碰并、聚合、粘附等二次气溶胶转化过程有所影响,粒子谱因而发生一系列变化,对气溶胶粒子的物理化学和环境特征造成很大影响。为了区分云内气溶胶和云外气溶胶,利用 FSSP 采样数据判断云区。根据 Hobbs 等^[21]给出的云区判别标准, FSSP 探头云粒子数浓度 $\geq 10 \text{ cm}^{-3}$ 的区域定义为云内,反之则为云外。据此判据,将观测到的云区内的云粒子数浓度和对应的观测高度(即为观测云所在高度)绘制见图4,图中散点空白的区域所对应的时间段为飞机在云外观测时段。可以发现,在2小时多的观测飞行全程中,穿云的时间只占很小一部分,飞行时穿越的高

空云区正是气溶胶粒子在高空出现小幅度增多的区域,进一步说明高空有云存在时,气溶胶粒子浓度会增大。四川盆地2010年9月10日、17日、26日、27日4次飞行云下观测到的气溶胶粒子平均数浓度分别为 210 cm^{-3} 、 254 cm^{-3} 、 163 cm^{-3} 、 260 cm^{-3} ,低于北京($356 \sim 2894 \text{ cm}^{-3}$, 2004年8-9月,8次)^[8]和石家庄($388 \text{ cm}^{-3} \sim 2311 \text{ cm}^{-3}$, 2010年10月,5次)^[22]的飞行观测结果,并且与北京和石家庄的观测结果量级相同,说明三地的气溶胶粒子数量级相当,气溶胶浓度大,同为大气环境重污染区域,且四川盆地大气环境污染相对北京和石家庄较轻,同时高浓度气溶胶会对云和降水及辐射造成很大影响。

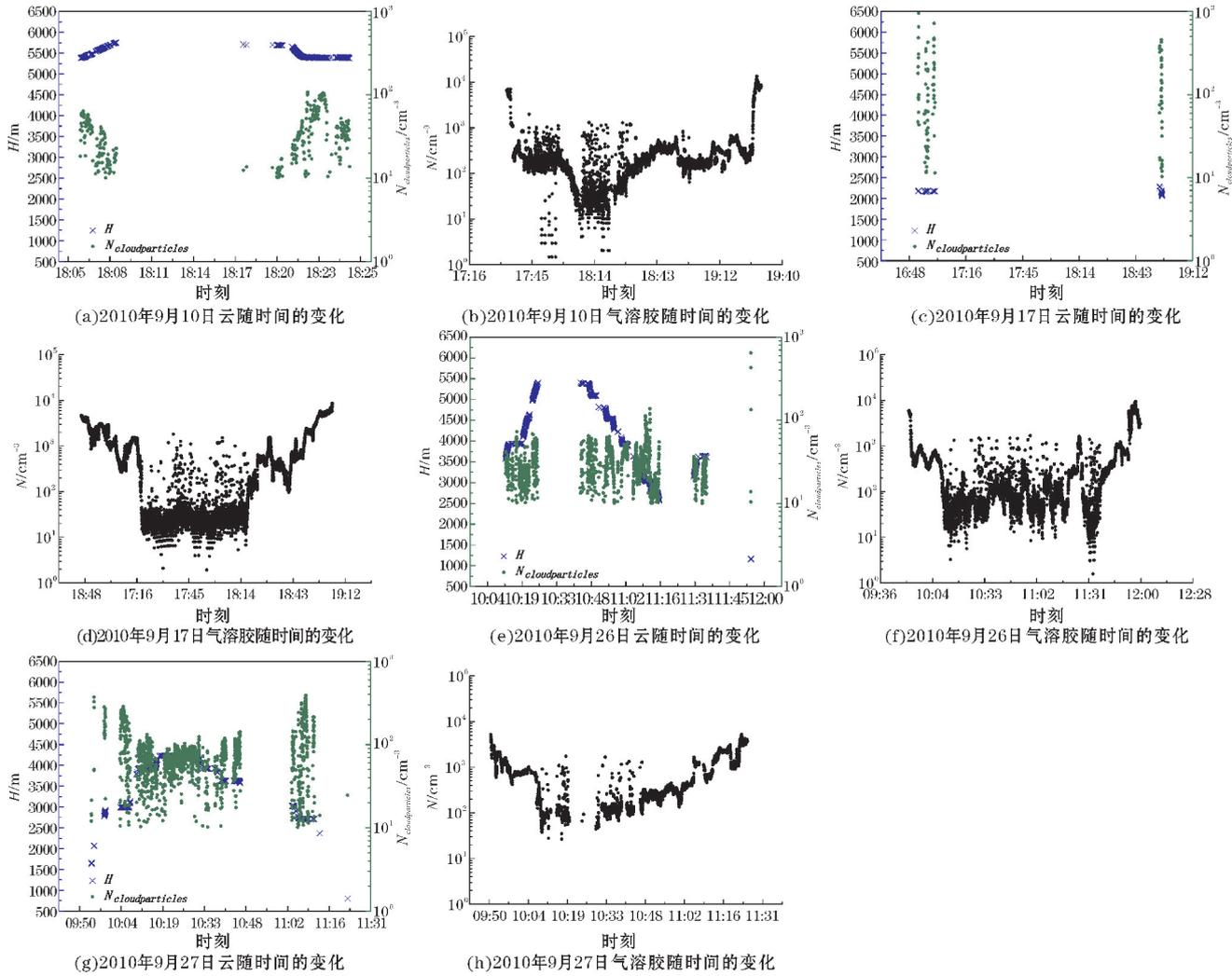


图4 $\geq 10 \text{ cm}^{-3}$ 的云粒子的高度(蓝色小叉)和数浓度(绿点)随时间的变化及气溶胶浓度随时间变化

3 各高度层的气溶胶粒子谱分布

为了剔除云内部分气溶胶粒子发生吸湿、碰并、聚合、粘附、凝结增长等变化对粒子谱的影响,在分析气溶胶粒子谱时选择云外的气溶胶粒子。为了描述气溶胶粒子的谱分布特征,用分散的尺度分档函数 $n_i(D_i)$ 来描述气溶胶粒子群, D_i 为第 i 通道气溶胶粒子中值直径,单位是 μm , $n_i(D_i)$ 为第 i 通道气溶胶粒子数,单位是 $\text{cm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$,气溶胶粒子数浓度 N 就等于各分档(各通道)气溶胶粒子数的总和,有 k 个通道观测气溶胶粒子,则

$$N = \sum_{i=1}^k n_i(D_i) \quad (1)$$

也可以写成:

$$N = \sum_{i=1}^k n_i(r_i) \quad (2)$$

其中, r_i 为第 i 通道气溶胶粒子中值半径。

在粒子分档足够细的情况下,尺度分布可以用连

续函数 $n(r)$ 表示,成为谱分布函数,于是有

$$N = \int_0^{\infty} n(r) dr \quad (3)$$

谱分布函数可以写成:

$$n(r) = \frac{dN}{dr} \quad (4)$$

也可以写成:

$$n(D) = \frac{dN}{dD} \quad (5)$$

这里,PCASP 探头分 15 个通道观测直径范围 $0.1 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子。各高度上气溶胶粒子谱分布绘出见图 5。可见,气溶胶粒子谱呈单峰、双峰或三峰分布。随着海拔高度的增加,气溶胶粒子谱宽变窄,同时,气溶胶粒子峰值浓度基本上随着高度的增加而降低。由于气溶胶粒子主要来自地面源排放,尺度越大的粒子随着高度的增加就会因重力沉降作用移出大气。各高度上的气溶胶粒子峰值浓度均出现在直径 $< 0.2 \mu\text{m}$ 的小粒子一侧,大多位于 $0.155 \mu\text{m}$ 或 $0.13 \mu\text{m}$,有一次出现在 $0.185 \mu\text{m}$ 。气溶胶粒子谱峰

值浓度出现后,粒子谱有的开始单调递减,有的出现了第二峰值,出现的第二峰值浓度均位于直径 $<0.5\ \mu\text{m}$ 的小粒子一侧,大多出现在 $0.275\ \mu\text{m}$,有一次出现在 $0.45\ \mu\text{m}$,还有的出现了第三峰值。具体地,4次探测中,近地面 $800\ \text{m MSL}$ (海拔高度), $300\ \text{m AGL}$ (离地高度)的气溶胶粒子谱与其他高度层上的粒子谱相比谱宽都是最宽的,但4次探测到的近地面气溶胶粒子谱宽大小又不相同,9月10日近地面气溶胶粒子谱宽 $2.75\ \mu\text{m}$,9月17日和27日是 $2.25\ \mu\text{m}$,9月26日是 $1.35\ \mu\text{m}$ 。近地面气溶胶粒子谱主要呈双峰型(9月10日呈三峰型),第一峰值出现在 $0.13\ \mu\text{m}$ (9月17日、26日)或 $0.155\ \mu\text{m}$ (9月10日、27日),第二峰值出现在 $0.275\ \mu\text{m}$,9月10日还在 $2.25\ \mu\text{m}$ 出现了第三峰值。在四川盆地通常的边界层顶^[23]($1500\ \text{m MSL}$, $1000\ \text{m AGL}$),气溶胶粒子谱主要呈三峰型(9月26日呈双峰型),第一峰值出现在 $0.155\ \mu\text{m}$ (9月10日、17日、26日)或 $0.13\ \mu\text{m}$ (9月27日),第二峰值出现在 $0.275\ \mu\text{m}$,第三峰值出现在 $0.45\ \mu\text{m}$ 。在 $2500\ \text{m MSL}$ ($2000\ \text{m AGL}$)高度上,气溶胶粒子谱出现了单峰型(9月26日)、双峰型(9月27日)和三峰型(9月10日、17日),第一峰值浓度出现在 $0.13\ \mu\text{m}$ (9月17日、27日)或 $0.155\ \mu\text{m}$ (9月10日、26日),有

的在 $0.275\ \mu\text{m}$ (9月17日、27日)或 $0.45\ \mu\text{m}$ (9月10日)出现了第二峰值,有的在 $0.45\ \mu\text{m}$ (9月17日)或 $1.35\ \mu\text{m}$ (9月10日)出现了第三峰值。在 $3200\ \text{m MSL}$ ($2700\ \text{m AGL}$)高度上,气溶胶粒子谱也出现了单峰型(9月27日)、双峰型(9月17日、26日)和三峰型(9月10日),第一峰值浓度出现在 $0.155\ \mu\text{m}$ (9月17日、26日、27日)或 $0.13\ \mu\text{m}$ (9月10日),有的在 $0.275\ \mu\text{m}$ (9月10日、17日、26日)出现了第二峰值,有的在 $0.45\ \mu\text{m}$ (9月10日)出现了第三峰值。在 $4200\ \text{m MSL}$ ($3700\ \text{m AGL}$)高度上,气溶胶粒子谱也出现了单峰型(9月17日、27日)、双峰型(9月26日)和三峰型(9月10日),第一峰值浓度出现在 $0.155\ \mu\text{m}$ (9月10日、27日)或 $0.13\ \mu\text{m}$ (9月17日)或 $0.185\ \mu\text{m}$ (9月26日),有的在 $0.275\ \mu\text{m}$ (9月10日、26日)出现了第二峰值,有的在 $0.45\ \mu\text{m}$ (9月10日)出现了第三峰值。在 $5800\ \text{m MSL}$ ($5300\ \text{m AGL}$)高度上,气溶胶粒子谱呈单峰型,峰值浓度出现在 $0.13\ \mu\text{m}$ 。显然,这样的谱型描述虽然提供了气溶胶粒子谱的部分特征,但是不能满足天气预报和数值模式的需求,所以接下来需要对观测的气溶胶粒子谱进行拟合分析,研究其谱模型和谱参数。

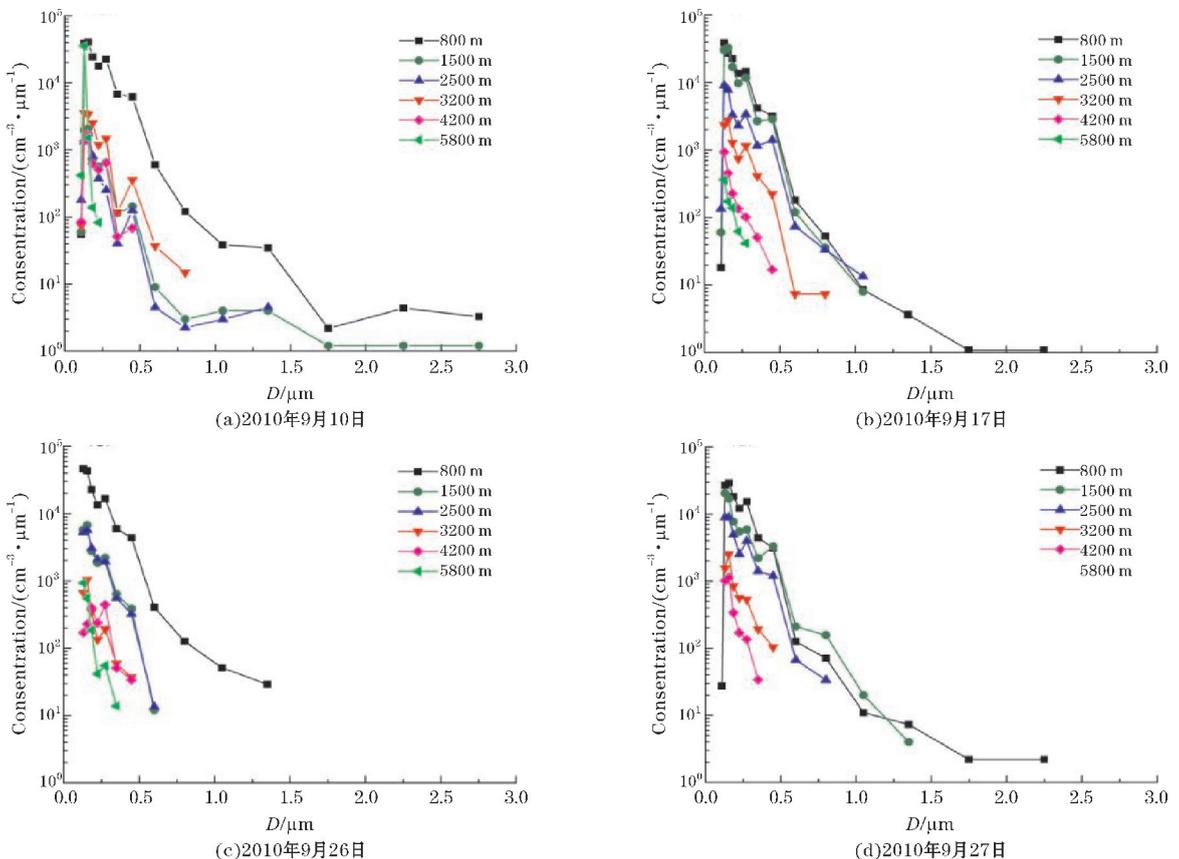


图5 气溶胶粒子谱分布

此外,计算得出4次飞行观测的各高度上的气溶胶粒子平均直径 \bar{D} 和直径的均方差 σ 见表2~3。可见,9月不同飞行日期观测到的同一海拔高度上的气溶胶粒子平均直径数值接近,彼此相差不超过 $0.05\ \mu\text{m}$,并且不同海拔高度上的气溶胶粒子平均直径也比较接近。同样是使用PCASP探头观测,四川盆

地各高度上的气溶胶粒子平均直径在 $0.13\sim 0.22\ \mu\text{m}$,而北京气溶胶粒子直径平均值集中在 $0.21\sim 0.31\ \mu\text{m}$ ^[9],石家庄气溶胶粒子平均直径值为 $0.18\sim 0.21\ \mu\text{m}$ ^[21],说明三地气溶胶粒子都集中在细粒子一侧,具有显著的城市工业气溶胶特征。

表2 气溶胶粒子平均直径 \bar{D}

日期	800 m	1500 m	2500 m	3200 m	4200 m	5800 m
9月10日	0.20	0.18	0.17	0.16	0.18	0.13
9月17日	0.19	0.19	0.19	0.19	0.17	0.16
9月26日	0.19	0.18	0.18	0.17	0.22	0.15
9月27日	0.20	0.19	0.19	0.18	0.16	N/A

表3 气溶胶粒子均方差 σ

日期	800 m	1500 m	2500 m	3200 m	4200 m	5800 m
9月10日	1.02	1.04	1.04	1.05	1.04	1.07
9月17日	1.03	1.03	1.03	1.03	1.05	1.05
9月26日	1.03	1.04	1.04	1.04	1.02	1.06
9月27日	1.03	1.03	1.03	1.04	1.05	N/A

4 气溶胶粒子谱拟合参数分析

用理论上常用的3种气溶胶粒子谱分布模型来拟合飞机观测得到的气溶胶粒子谱分布曲线。这3种气溶胶粒子谱分布模型分别如下。

其一,德国科学家荣格于20世纪中期提出的Junge分布:

$$n(D) = \frac{dN}{d\lg D} = c_1 D^{-v} \quad (6)$$

用非对数形式表示,则为

$$n(D) = \frac{dN}{dD} = \frac{1}{\ln 10} c_1 D^{-(v-1)} \quad (7)$$

简化为

$$n(D) = \frac{dN}{dD} = \alpha D^{-\beta} \quad (8)$$

式中, c_1 、 v 、 α 、 β 为常数。式(7)、式(8)中各有2个参数,这种粒子谱为双参数负指数谱。

其二,中国科学院大气物理研究所提出的三参数尺度谱模型^[24]:

$$n(r) = Ar^B e^{-Cr} \quad (9)$$

也可以写成:

$$n(D) = aD^b e^{-cD} \quad (10)$$

式中, A 、 B 、 C 、 a 、 b 、 c 为常数。式(9)、式(10)中各有3个参数,为三参数尺度谱。不难看出,这种三参数尺度谱是一种修正的 Γ 谱。

其三,对数正态分布:

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \frac{a_1}{\sqrt{2\pi} \cdot (\ln 10 \cdot r \cdot b_1)} e^{-\frac{(\ln r - \ln c_1)^2}{2b_1^2}} \quad (11)$$

也可以写成:

$$n(D) = \frac{dN}{dD} = \frac{a_2}{\sqrt{2\pi} \cdot (\ln 10 \cdot D \cdot b_2)} e^{-\frac{(\ln D - \ln c_2)^2}{2b_2^2}} \quad (12)$$

式中, a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 为常数。式(11)、式(12)中各有3个参数,这种粒子谱为三参数对数正态分布谱。

这3种气溶胶粒子谱分布模型在各高度层的拟合情况如图6~11。对于各高度层的气溶胶粒子,比较拟合曲线和观测谱分布曲线,可以发现,三种谱分布拟合形式中都是三参数尺度谱分布拟合最优,其次是Junge谱,三参数对数正态分布谱拟合曲线和观测谱分布曲线偏离较大。进一步分析3种谱分布拟合结果的拟合优度,比较各自的校正决定系数。若校正决定系

数接近 1, 则表明拟合效果很好。若校正决定系数不在 0 ~ 1, 则表明拟合效果很差。分析表明, 三参数尺度谱拟合的校正决定系数最大 (0.59 ~ 0.96), Junge 谱拟合的校正决定系数次之 (0.31 ~ 0.94), 三参数对数正态分布谱的校正决定系数最小, 并在有的高度层

出现负值, 拟合效果差。由此可见, 在四川盆地气溶胶谱参数方案设计时, 三参数尺度谱是较好的选择, 也可以采用 Junge 谱, 而三参数对数正态分布谱则是不适用的。

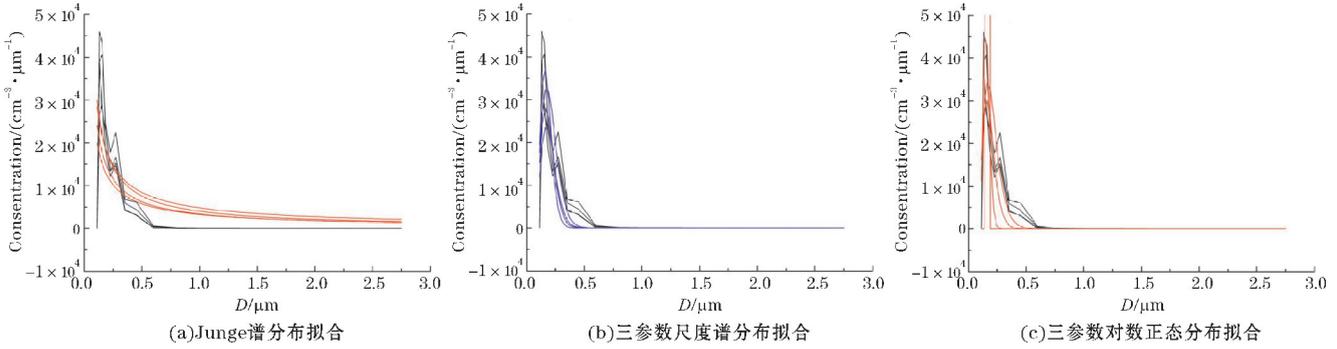


图6 海拔高度 800 m 气溶胶粒子谱拟合曲线(黑色实线为观测谱分布曲线)

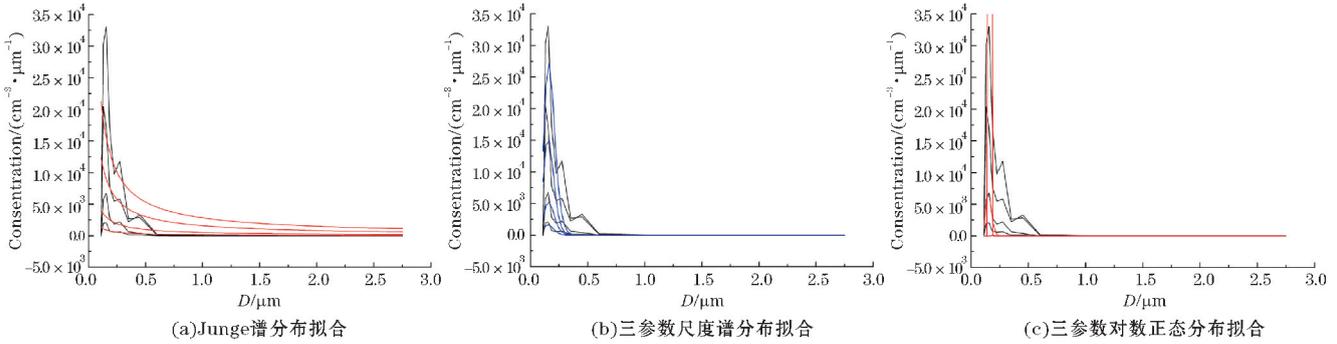


图7 海拔高度 1500 m 气溶胶粒子谱拟合曲线(黑色实线为观测谱分布曲线)

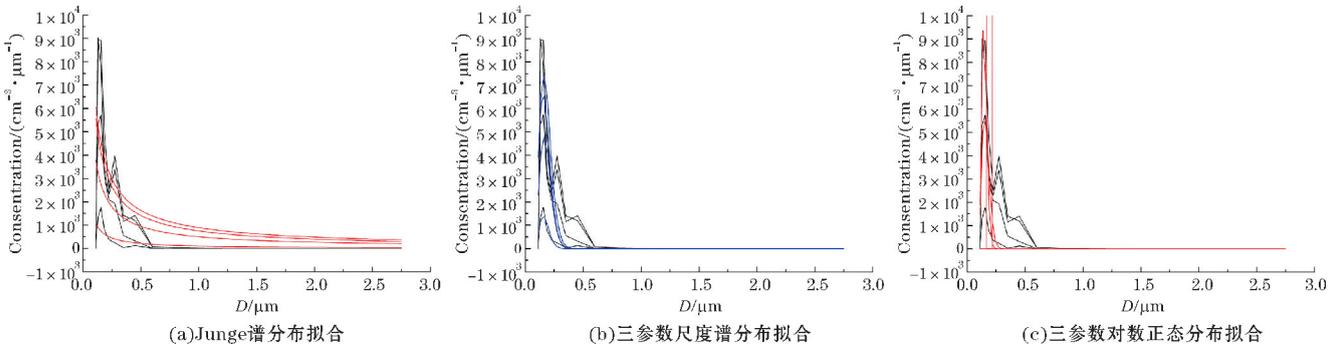


图8 海拔高度 2500 m 气溶胶粒子谱拟合曲线(黑色实线为观测谱分布曲线)

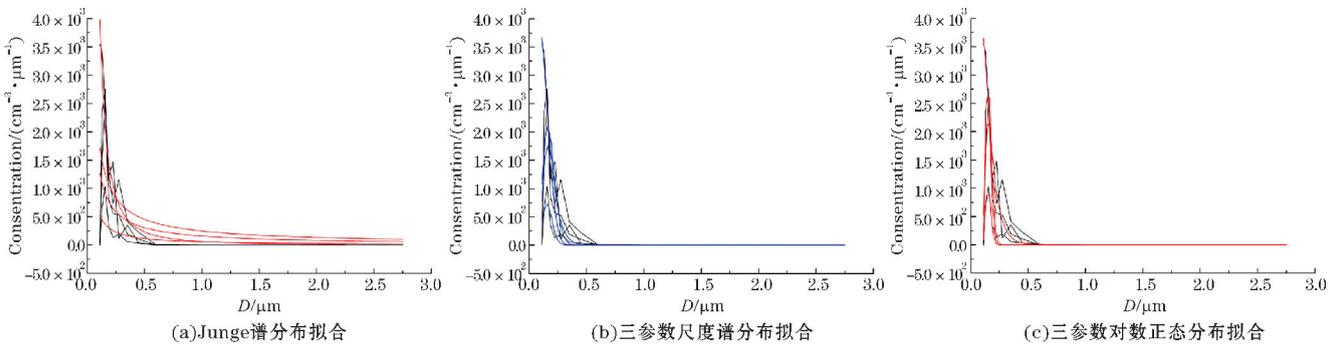


图9 海拔高度 3200 m 气溶胶粒子谱拟合曲线(黑色实线为观测谱分布曲线)

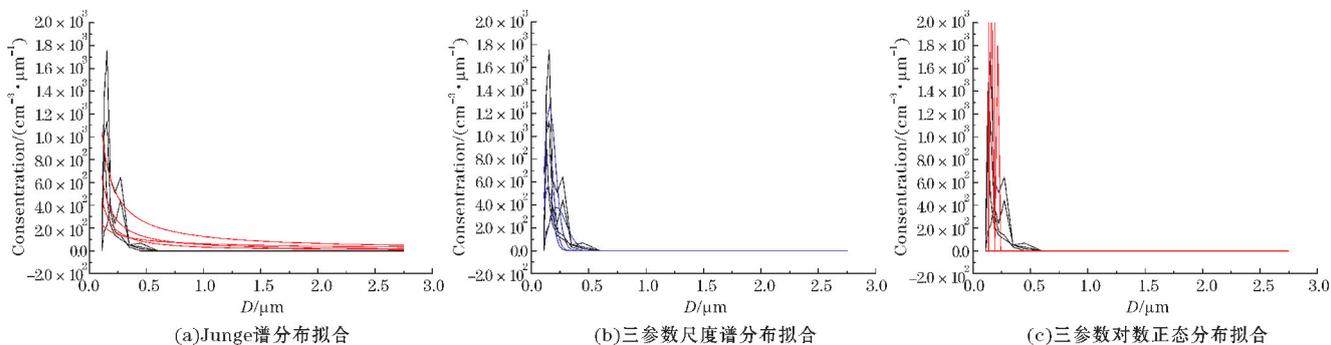


图 10 海拔高度 4200 m 气溶胶粒子谱拟合曲线(黑色实线为观测谱分布曲线)

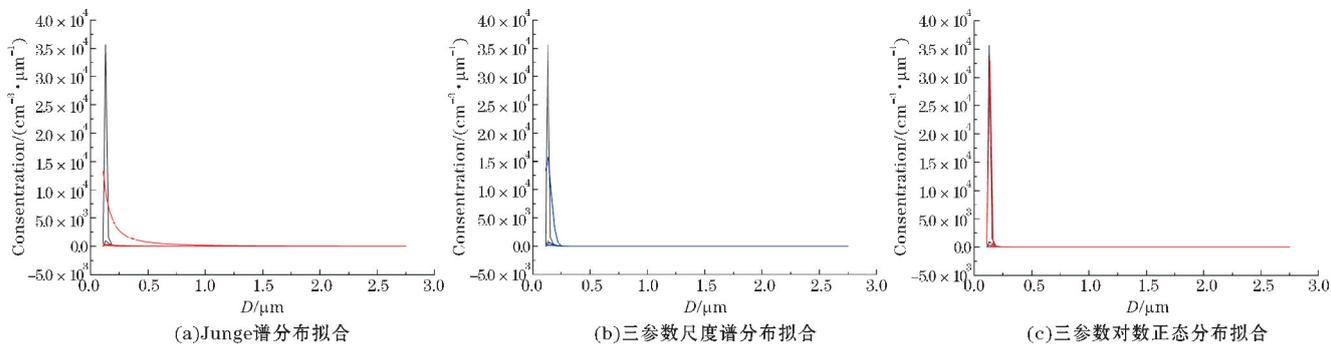


图 11 海拔高度 5800 m 气溶胶粒子谱拟合曲线(黑色实线为观测谱分布曲线)

根据拟合曲线求解 Junge 谱参数,得到 Junge 谱参数 v 的值(表 4),发现在 2500 m 高度以下 v 约为 2,和雾的 Junge 指数典型值一致,在 2500 m 高度以上 v 在 2~3 变化,介于雾和霾的 Junge 指数典型值之间。

表 4 Junge 谱参数 v 的值

日期	800 m	1500 m	2500 m	3200 m	4200 m	5800 m
9 月 10 日	1.8	2.0	2.1	2.9	2.0	2.9
9 月 17 日	1.9	1.9	1.9	1.9	2.2	2.2
9 月 26 日	1.9	1.9	1.9	2.0	1.6	2.3
9 月 27 日	1.8	1.9	1.9	1.9	2.1	N/A

根据拟合曲线求解三参数尺度谱函数 $n(D) = aD^b e^{-cD}$,得到谱参数 a, b, c 的值(表 5),发现随着海拔高度的变化,三参数尺度谱的参数 a 变化非常大,参数 b 和参数 c 的变化较小。

表 5 三参数尺度谱参数值

日期	a	b	c
9 月 10 日	$4.8 \times 10^6 \sim 5.0 \times 10^{28}$	2.0~18.5	24.4~144.1
9 月 17 日	$4.6 \times 10^{14} \sim 3.6 \times 10^{21}$	8.4~14.7	50.9~102.8
9 月 26 日	$1.9 \times 10^{12} \sim 2.7 \times 10^{22}$	8.9~15.7	40.1~107.1
9 月 27 日	$4.6 \times 10^{13} \sim 6.9 \times 10^{21}$	7.8~15.0	44.9~100.1

根据拟合曲线求解三参数对数正态分布谱函数

$$n(D) = \frac{a_2}{\sqrt{2\pi} \cdot (\ln 10 \cdot D \cdot b_2)} e^{-\frac{(\ln D - \ln \bar{D})^2}{2b_2^2}}, \text{ 得到谱参数}$$

a_2, b_2, c_2 的值(表 6)。

表 6 三参数对数正态分布参数值

日期	a_2	b_2	c_2
9 月 10 日	$2.9 \times 10^2 \sim 2.2 \times 10^4$	0.01~0.49	0.13~0.20
9 月 17 日	$7.4 \times 10^1 \sim 3.0 \times 10^5$	0.01~0.30	0.15~0.18
9 月 26 日	$7.0 \times 10^1 \sim 7.6 \times 10^3$	0.01~0.20	0.15~0.22
9 月 27 日	$3.2 \times 10^2 \sim 3.1 \times 10^6$	0.01~0.14	0.15~0.20

从表 2、表 3、表 6 可以发现,谱参数 c_2 的值非常接近对应的气溶胶粒子平均直径 \bar{D} ,谱参数 b_2 的值非常接近对应的气溶胶粒子的均方差 σ 的自然对数。所以,三参数对数正态分布谱可以写成:

$$n(D) = \frac{a_3}{\sqrt{2\pi} \cdot (\ln 10 \cdot D \cdot \ln \sigma)} e^{-\frac{(\ln D - \ln \bar{D})^2}{2(\ln \sigma)^2}} \quad (13)$$

其中 a_3 为常数。直径典型值见表 7。这一结果也与本次观测发现的气溶胶粒子主要为细粒子,其尺度大于细烟煤小于粗尘和海洋粒子的观测事实相符合。

表 7 气溶胶直径典型值

气溶胶观测事件	\bar{D}	σ
本次观测拟合研究	0.18	1.06
细烟煤 ^[25]	0.02	4.00
粗尘 ^[25]	1.00	5.97
海洋粒子 ^[25]	0.60	5.02

5 结论

基于飞机观测资料,分析了四川盆地2010年9月的气溶胶粒子谱特征,得到如下主要结论:

(1)2010年9月4次飞行观测的气溶胶粒子尺度为 $0.1 \sim 3.0 \mu\text{m}$,其平均数浓度分别为 210 cm^{-3} 、 254 cm^{-3} 、 163 cm^{-3} 、 260 cm^{-3} ,与北京2004年8-9月8次飞行观测和石家庄2010年10月5次飞行观测的气溶胶数浓度量级相同,表明四川盆地9月气溶胶浓度较大。同时,低层气溶胶浓度大,说明气溶胶主要来源于地面。总体上,越往高层,气溶胶粒子受重力沉降作用而移出大气的越多,气溶胶浓度越小。但高空有云出现时,气溶胶浓度会有小幅度增大。

(2)各高度上的气溶胶粒子平均直径在 $0.13 \sim 0.22 \mu\text{m}$,表明四川盆地9月气溶胶粒子大多为细粒子,呈现显著的城市工业气溶胶特征。

(3)气溶胶粒子谱呈单峰、双峰或三峰分布。近地面气溶胶粒子谱宽最宽,随着海拔高度的增加,气溶胶粒子谱变窄,气溶胶粒子峰值浓度大体上降低。

(4)基于飞机观测事实,四川盆地9月的气溶胶粒子谱用三参数尺度谱拟合最优,其次是 Junge 谱,而三参数对数正态分布谱的拟合效果不好。

参考文献:

- [1] Coakley J, Jr, Cess D, Yurevich B. The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: A parameterization for climate models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1983, 40(1): 116-138.
- [2] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D6): 6831-6864.
- [3] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 2000, 287(5459): 1793-1796.
- [4] Teller A, Levin Z. The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: a sensitivity study using a numerical cloud model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, 6(1): 67-80.
- [5] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述 [J]. *气象学报*, 2002, 60(5): 625-634.
- [6] 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 477-498.
- [7] 马新成, 毕凯, 田海军, 等. 北京地区沙尘天气气溶胶飞机观测特征 [J]. *气象科技*, 2016, 44(1): 95-103.
- [8] 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研究 [J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 49-62.
- [9] 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等. 石家庄地区春季晴、霾天气气溶胶观测研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(5): 705-713.
- [10] Li J, Li P, Ren G, et al. Aircraft measurements of aerosol distribution, warm cloud microphysical properties, and their relationship over the Eastern Loess Plateau in China [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2019, 71: 1-18.
- [11] Li J, Yin Y, Li P, et al. Aircraft measurements of the vertical distribution and activation property of aerosol particles over the Loess Plateau in China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 155: 73-86.
- [12] 李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(S): 108-117.
- [13] 魏强, 高建春, 钱越英. 机载粒子测量系统及资料处理 [J]. *气象*, 1997, 23(5): 37-40.
- [14] 嵇磊, 张蕾, 马新成, 等. 奥运开幕日北京周边云系宏观微观结构飞行探测研究 [J]. *气象*, 2008, 34(S1): 121-125.
- [15] 赵增亮, 毛节泰, 魏强, 等. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析 [J]. *气象*, 2010, 36(5): 71-77.
- [16] 赵增亮, 毛节泰, 王磊, 等. 一次典型层积云的飞机观测结果及与卫星资料的对比分析 [J]. *气象学报*, 2011, 69(3): 521-527.
- [17] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟 [J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 418-427.
- [18] 李晓静, 张鹏, 张兴赢, 等. 中国区域 MODIS 陆上气溶胶光学厚度产品检验 [J]. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 147-156.
- [19] 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 等. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2015, 45(4): 427-443.
- [20] 邓雪娇, 李菲, 吴兑, 等. 广州地区典型清洁与污染过程的大气湍流与物质交换特征 [J]. *中*

- 国环境科学,2011,31(9):1424-1430.
- [21] Hobbs V, Rangno L. Microstructures of low and middlelevel clouds over the Beaufort Sea [J]. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc, 1998, 124 (550): 2035-2071.
- [22] 孙玉稳,孙霞,银燕,等. 华北平原中西部地区秋季(10月)气溶胶观测研究[J]. 高原气象, 2013,32(5):1308-1320.
- [23] 徐桂荣,崔春光,周志敏,等. 利用探空资料估算青藏高原及下游地区大气边界层高度[J]. 暴雨灾害,2014,33(3):217-227.
- [24] 游荣高,任丽新. 北京采暖期间和采暖期前大气气溶胶物理特性的对比研究[J]. 大气科学, 1990,14(3):354-363.
- [25] 耿蒙. 典型地区大气气溶胶谱分布和折射率特征研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017.

Aerosol Particle Spectra Analysis over Sichuan Basin in September based on Airborne Observation

WANG Weijia^{1,2}, LI Hongyu³

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;3. Weather Modification Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: By using in-situ airborne observation data from PMS (Particle Measuring System) probes, the vertical distribution and the size spectrum distribution at different heights of aerosol particles between 0.1 microns and 3.0 microns over Sichuan Basin in September are analyzed, and the fitting analyzing of the aerosol particle spectra are implemented as well. The results show that, in September, 2010, the mean number concentration of aerosol particles observed during the four flights over Sichuan Basin are 210 cm^{-3} , 254 cm^{-3} , 163 cm^{-3} , 260 cm^{-3} respectively, with a magnitude which is the same as that of the aerosols from in-situ airborne observation over Beijing and Shijiazhuang. The mean diameters of aerosol particles at different heights range between 0.13 microns and 0.22 microns, and the majority of the aerosol particles over Sichuan Basin in September are fine particles, demonstrating obvious urban-industry aerosol characteristics. The size spectra of aerosol particles show one peak, two peaks or three peaks. As a whole, the concentration and the spectral width of aerosol particles decrease with altitude. However, when clouds cover at high altitudes, the concentration of aerosols at those altitudes will increase a bit. The aerosol particle spectrum in Sichuan Basin in September satisfies the Junge spectrum distribution, and the fitting of the three-parameter scale spectrum is closer to the facts of airborne observations. But the fitting effect of the three-parameter lognormal distribution spectrum is not good.

Keywords: aerosol; particle spectra; airborne PMS observation; Sichuan Basin