引用格式:董晓波, 杨 军, 杨 洋, 等. 华北重度霾过程期间大气气溶胶粒子的微物理垂直特征[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 204—211

Dong Xiaobo, Yang Jun, Yang Yang, et al. Microphysical characteristics in the vertical direction of atmospheric aerosol particles of North China during the heavy haze process background[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 204—211

天文学、地球科学

华北重度霾过程期间大气气溶胶粒子的微物理垂直特征

董晓波[1,2] 杨 军[1*] 杨 洋[2] 吕 峰[2] 范根昌[2] 胡向峰[2]

(南京信息工程大学大气科学学院[1], 南京 21004;河北省人工影响天气办公室[2],石家庄 050021)

摘 要 在华北重度霾过程期间(2013年9月30日),利用夏延ⅢA的飞机观测资料分别对石家庄和邢台的气溶胶粒子谱分布,气溶胶(cloud nuclei, CN)与云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)垂直分布特征进行了分析。研究结果表明,两地的气溶胶数浓度均随着高度的增加而减小,气溶胶粒子有效半径比较接近,积聚模态和粗模态气溶胶粒子有效半径的范围分别在0.05~0.35 μm,0.8~2.2 μm之间。两地的边界层内和边界层以上均出现了逆温层,且逆温层之下的气溶胶数浓度均出现明显增加现象。对气溶胶后向轨迹的分析结果表明:3 000 m高度处的气溶胶主要是随气团远距离输送而来;1 500 m高度处的气溶胶主要来自南边近地面污染物排放,输送距离较短;500 m高度处的气溶胶受偏南气团的影响,主要由高浓度的气溶胶细粒子组成。云凝结核的垂直分布结果表明,CCN数浓度随高度的增加而减小,逆温层的存在对CCN有一定的累积效应。对石家庄(邢台)市的CCN与气溶胶数浓度做相关性分析,结果表明两地的CCN与气溶胶的总相关系数均在0.95以上,而淡积云内相关系数仅为0.83,且云内的CCN数浓度明显低于云外,因此表明了云滴活化对CCN的消耗作用。云凝结核的数浓度随高度的增加而减小,逆温层的存在对CCN有一定的累积效应。云底以下的气溶胶粒子谱宽较窄,云内和云顶以上的气溶胶粒子谱较宽。

关键词 霾 气溶胶 CCN 飞机探测 华北

中图法分类号 P427.2; **文献标志码** A

霾是指悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体均匀地浮游在空气中,使水平能见度降低到10 km以下的一种天气现象。霾主要由气溶胶组成,它可在一天中任何时候出现。霾作为一种自然现象,其形成主要有三方面因素,一是水平方向静风现象的增多;二是垂直方向的逆温现象;三是悬浮颗粒物的增加[1]。霾天气中气溶胶由于受到污染源、气象条件和湍流垂直交换等因素的影响,其分布特征非常复杂,在大气环境、云和降水及气候变化领域中有着重要作用[2]。气溶胶不仅可以通过散射作用,加大行星散射率,使大气系统降温,使地面温度下降,产生了负的强迫作用,使大气温度升高,影响温度垂直廓线[3,4],从而影响地气系统的辐射平衡;还可以作为云凝结核(CCN)影响云的微物理过程和光学性质以及云的生命周期和降雨过程[5—9]。

2017年6月22日收到 河北省气象局科研开发项目(14ky21,15ky36)资助

第一作者简介:董晓波(1982—),男,河北柏乡县人,高级工程师。研究方向:飞机人工增雨及大气探测研究。E-mail: xb.dong@qq.com。

伴随经济迅速增长和城市化进程的加快,大量的气溶胶被排放到大气中,霾天气出现频率也迅速增加。华北地区是中国北方重要的经济中心,也是霾天气的高发区,其中以河北南部地区尤为突出[10,11]。石家庄市和邢台市作为我国污染最为严重的10个城市之一,作为我国华北中南部地区非常有代表性的城市群,对该区域气溶胶的空间分布特征进行观测及分析,有助于进一步研究大气环境及气溶胶与天气背景的关系,可为空气质量预报、天气气候预测及数值模拟等提供客观真实的参考依据,具有非常重要的意义。

在众多的气溶胶观测方式中,利用飞机搭载气溶胶粒子探头,可直接获取目标区域内飞行时段中不同高度上气溶胶数据,对于了解气溶胶的垂直和水平结构有独特的优势,因此成为研究气溶胶粒子分布特征的重要手段[12]。Levin 等[13]通过机载和地基观测设备对死海上空的霾化学和物理特性进行

观测,结果显示霾明显分成两层,一层位于海拔高度 300 m,另外一层位于海拔高度 −150 m(距离死海海面 250 m),下层霾中发现含有大量尺寸大于 1 mm 的硝酸钠粒子,这一层的粒子可能是夜晚从污染源输送而来,而上面一层霾中发现较高浓度的硫酸盐细颗粒,这层的粒子可能来自较远的以色列地中海沿岸地区甚至是欧洲。孙玉稳等[14]通过研究指出,石家庄气溶胶的分布规律不仅与排放源分布特征有直接关系,还受到大气层结状态、气象条件和下垫面的影响。张瑜等[15]利用河北省 2005 年 10 月份的飞机探测资料分析了石家庄地区不同天气条件下气溶胶垂直分布和尺度谱,结果表明气溶胶的分布与大气环境密切相关,相对湿度较大,水汽含量较多有利于小粒子凝结水汽,使粒子直径增大。李军霞等[16,17]对华北西部地区的气溶胶和 CCN 的分布特征进行了观测分析,发现温度垂直廓线特别是逆温层结的存在会使得气溶胶和 CCN 在边界层顶形成数浓度的大值区,垂直廓线表现为峰值。

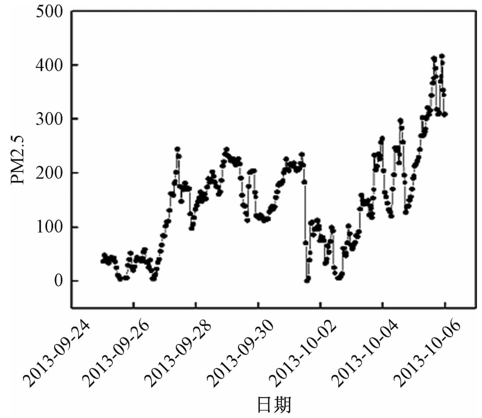
以上研究使得人们对大气气溶胶微物理垂直结构特征有了较清晰的认识,但针对华北区域性重度霾天气过程期间的气溶胶微物理垂直结构特征研究还十分有限。2013 年 9 月 27 日到 10 月 1 日,受高空纬向环流和地面弱气压场影响,京津冀地区持续出现重度霾天气。本文利用 2013 年 9 月 30 日的飞机观测资料结合地面常规观测,着重分析华北中南部地区霾天气条件下气溶胶粒子和 CCN 的垂直分布特征,为重度霾天气条件下气溶胶与 CCN 的研究提供科学依据。

1　观测简介

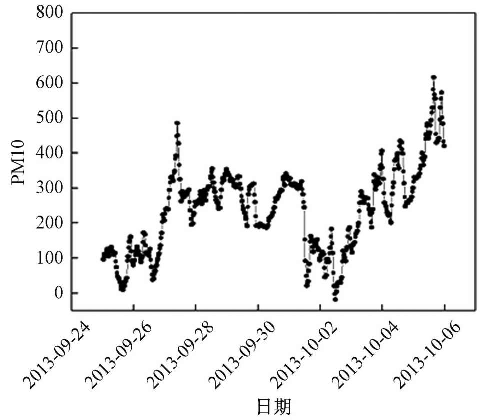
1.1　天气背景及飞行概况

从 2013 年 9 月 27 日到 10 月 1 日之间,京津冀地区持续霾天气。石家庄市区环保局同期 PM 2.5 和 PM 10观测数据显示(图 1),9 月 30 日,石家庄市区 PM 2.5和 PM 10最大值分别达到 400 μg/m^3 和 600 μg/m^3,属于重度污染。13 时国家环保部发布的空气质量指数(AQI),邢台市的 AQI 为 476,全国空气污染排名第一位,石家庄市的 AQI 为 300,全国空气污染排名第六位。随着 10 月 2 日冷空气的到来,京津冀地区的连日重度霾过程结束。

为了揭示华北重度霾天气过程中的气溶胶微物理垂直特征,9 月 30 日在石家庄和邢台上空进行了垂直探测飞行。15:32 飞机从石家庄正定机场起飞,16:07 到达邢台市上空,开始从 600 ~ 6 900 m绕市区做垂直探测飞行;17:15 飞机到达石家庄市上空,围绕市区二环 600 ~ 6 900 m 做垂直探测飞行(飞行路线见图 2)。



(a) PM2.5



(b) PM10

图 1　石家庄市区环保局同期 PM 2.5和 PM 10观测数据

Fig. 1　PM2.5 and PM10 observation data from Shijiazhuang Environmental Protection Bureau

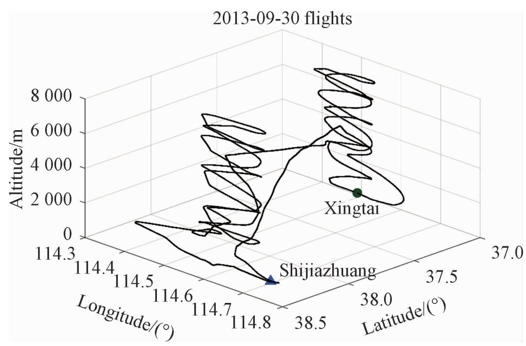


图 2　飞机探测飞行轨迹

Fig. 2　The flight path of aircraft measurement

1.2　观测仪器

夏延ⅢA 飞机作为本次观测的探测平台,使用的仪器主要为气溶胶粒子探头(Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe—100X、PCASP—100X)、前向散射滴谱探头(Forward Scattering Spectrometer Probe、PMS Model FSS-100—ER、FSSP—100—ER)和云凝结核计数器(Cloud Condensation Nuclei Counter—100、CCN—100),以及温度探头、热线含水量仪与 GPS 全球定位系统(表 1)。

表1 PMS 机载观测系统主要探测仪器

Table 1 Primary probes of airborne particle measuring system

/μm

设备名称	型号	探测范围
被动腔气溶胶谱探头	PCASP—100X	0.1~3.0（共15档）
前向散射滴谱探头	FSSP—100—ER	1.0~95.0,4个量程(各分15档)
二维光阵灰度云粒子探头	OAP—2D—GA2	25~1 550（共62档）
二维光阵灰度降水粒子探头	OAP—2D—GB2	150~9 300（共62档）
云凝结核计数器	CCN—100	0.7~10.0

FSSP 和 PCASP 探头根据米散射理论，按照散射光强的大小来推算粒子的尺寸。前向散射滴谱(FSSP—100—ER)探头用来探测云粒子，共有4个量程(Range = 0,1,2,3)，每个量程各分为15个等间隔的通道，整体测量范围是1.0~95.0 μm，探头的最小分辨率为1 μm。PCASP—100X 探头用来探测大气气溶胶粒子，测量范围是0.1~3.0 μm，分为15个间隔不完全相等的通道，最小分辨率为0.02 μm，观测采样频率为1 Hz。云凝结核计数器 CCN—100 可以测量大气中0.1%~2%过饱和度下的云凝结核数量，对研究云与气溶胶关系、云降水物理过程和云-气候变化具有重要意义。

1.3 资料处理

Whitby[18]在20世纪70年代分析得出了大气气溶胶尺度分布由三个分离的模态组成，分别为核模态($r<0.05$ μm)，积聚模态(0.05 μm $<r<$ 1.0 μm)和粗模态($r>1.0$ μm)。现根据仪器测量范围对积聚模态(0.05 μm $<r<$ 1 μm)和粗模态(1.0 μm $<r<$ 8 μm)的气溶胶粒子进行统计，分析积聚模态和粗模态气溶胶在垂直方向的数浓度和粒子尺度的分布状态，并且结合相同时段内温度的垂直分布状况研究两者之间的关系。飞行观测期间石家庄低空有云存在，1 700 m以下有云区域使用 FSSP 的2~46 μm量程，1 700~6 900 m范围使用 FSSP 的1~16 μm量程，邢台上空粗模态气溶胶观测的飞行高度则为600~6 900 m。数据处理上，积聚模态和粗模态气溶胶粒子数浓度采取了每100 m间隔的数浓度平均值。两地上空600~6 900 m垂直方向都存在双层逆温，石家庄市上空分别在1 400~1 700 m和4 200~4 400 m存在逆温层，邢台市上空分别在1 300~1 700 m和3 700~4 100 m存在逆温层。

2 结果与讨论

2.1 气溶胶垂直分布特征

图3分别给出了飞机在邢台市和石家庄市上空垂直爬升时积聚模态、粗模态气溶胶粒子的数浓度垂直分布廓线。从图3中可以看出，积聚模态、粗模态气溶胶粒子数浓度均随高度增加而减小。其中，石家庄市上空的积聚模态粒子数浓度平均值最高为4 755个/cm^3，粗模态粒子数浓度平均值最高为6.3个/cm^3；邢台市上空的气溶胶粒子数浓度平均值最高为4 701个/cm^3，粗模态粒子数浓度平均值最高为7.3个/cm^3。由于石家庄市上空1 400~1 700 m，邢台市上空1 300~1 700 m逆温层的存在，阻碍了近地面气溶胶的垂直输送，导致大量气溶胶粒子在逆温层底累积，因此数浓度较大。1 700 m以上，两地的积聚模态、粗模态粒子浓度值迅速递减，但是在石家庄市上空4 200~4 400 m，邢台市上空3 700~4 100 m分别出现第二个逆温层，阻断了两层逆温层之间的气溶胶向上扩散，使得石家庄市上空1 700~4 300 m，邢台市上空1 700~3 700 m的积聚模态粒子平均浓度值分别达到477个/cm^{3}和306个/cm^3。结合温度廓线和气溶胶垂直廓线，边界层逆温的出现会阻碍垂直输送，导致逆温层上下气溶胶分布不连续，气溶胶粒子在逆温层底部累积。两层逆温之间的气溶胶虽然随高度减小，但是变化幅度不大，基本在500个/cm^{3}左右，其中积聚模态粒子数浓度随着高度的增加缓慢减小，粗模态粒子随着高度的增加而增加。

图4(a)为两地的积聚模态粒子的有效半径垂直分布，可以看出积聚模态气溶胶粒子有效半径一般在0.05~0.35 μm之间，粗模态气溶胶粒子有效半径一般在0.8~2.2 μm之间。石家庄市积聚模态气溶胶粒子有效半径最大为0.32 μm，粗模态气

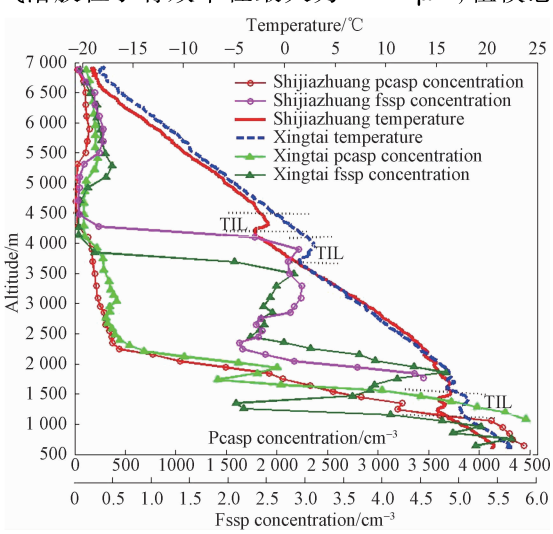


图3 石家庄市和邢台市上空积聚模态粒子、粗粒子模态数浓度和温度的垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of aerosol concentration and temperature over Shijiazhuang and Xingtai

溶胶粒子有效半径最大为 2. 15 μm,邢台市积聚模态气溶胶粒子有效半径最大为 0. 31 μm,粗模态气溶胶粒子有效半径最大为 2. 02 μm,两地均出现两次极大值。高度为 1 000 ~ 1 500 m 之间时,石家庄上空积聚模态气溶胶粒子数浓度和有效半径均大于邢台。高度在 3 000 ~ 3 500 m 之间时,两地的积聚模态粒子数浓度相近,石家庄的粗模态粒子数浓度高于邢台,使得石家庄气溶胶有效半径的极大值高于邢台。总体来看,两地气溶胶粒子数浓度比较接近,粒子有效半径大小比较相近。

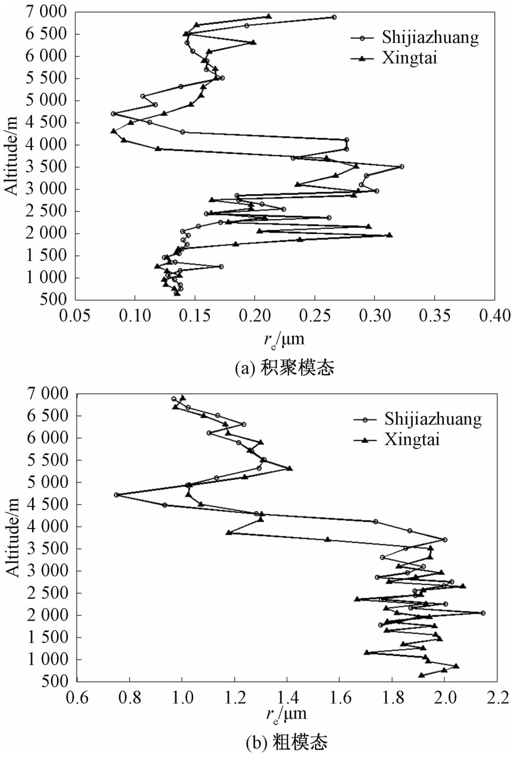


图 4　石家庄和邢台气溶胶有效半径垂直廓线

Fig. 4　The vertical profile of aerosols effective radius of Shijiazhuang and Xingtai

孙玉稳等[19]在华北平原中西部地区秋季(10 月)气溶胶观测研究中利用 PCASP 观测数据统计了 2010 年 10 月份 19 架次的垂直气溶胶飞行观测,得到石家庄市上空秋季气溶胶浓度平均值为388 ~ 2 311 个/cm^3,有效半径平均值为 0. 09 ~ 0. 1 μm;邢台市上空秋季气溶胶浓度平均值为 1 555 ~ 3 961 个/cm^3,有效半径平均值为 0. 09 ~ 0. 1 μm。可见,石家庄市、邢台市秋季气溶胶浓度值均较高,污染较重。胡向峰等[20]利用 2010 年 9 月 1 日一次 PCASP 观测气溶胶数据和孙霞等[21]利用 2008 年 5 月 26 日一次 PCASP 观测气溶胶数据分析边界层内气溶胶浓度极大值分别为 2 818. 7 个/cm^3 和 2 342. 9 个/cm^3,有效半径平均值为 0. 1 μm 和 0. 09 μm。Shi 等[22]在 2009 年秋季在华北地区污染较为严重的城市——石家庄市上空进行了雾霾天气(3 架次)和晴朗天气(2 架次)的飞机观测,结果表明雾霾天气下城市上空边界层内气溶胶最高浓度分别为 8 110 个/cm^3、8 084 个/cm^3 和 7 784 个/cm^3,CCN 最高浓度分别为 2 432 个/cm^3、2 081 个/cm^3 和 1 852 个/cm^3;而晴朗天气下气溶胶最高浓度分别为 1 614 个/cm^3 和 1 030 个/cm^3,CCN 最高浓度分别为 305 个/cm^3 和 284 个/cm^3。雾霾天气下 600 ~ 2 500 m 高度层内气溶胶平均浓度和 CCN 平均浓度分别是晴朗天气下的 4 倍和 3 倍以上。此次重霾天气下石家庄市积聚模态气溶胶浓度最大值是孙玉稳等统计的 2010 年秋季气溶胶浓度平均值的 2 倍,有效半径值是其 3 倍;邢台市上空积聚模态气溶胶浓度最大值是孙玉稳等统计的 2010 年秋季气溶胶浓度平均值的 1. 2 倍,有效半径值是其 3 倍;与胡向峰等 2010 年 9 月 1 日和孙霞等 2008 年 5 月 26 日两次霾天气下气溶胶分析个例对比,此次重霾天气下石家庄市边界层内积聚模态气溶胶浓度分别是这两个个例气溶胶浓度的 1. 7 倍和 2 倍,有效半径分别是其 3 倍和 3. 5 倍。虽然气溶胶浓度与 Shi 等 2009 年的雾霾天气观测对比有所降低,但仍旧是晴朗天气下的 3 倍 ~ 4 倍。因此,此次重霾天气下的气溶胶粒子具有浓度值很高,有效半径较大的特点。

2. 2　气溶胶谱分布特征

对比两地的气溶胶谱分布(图 5),石家庄市和邢台市谱分布均是单峰分布,谱宽随着高度变窄,但是石家庄 1 200 m 高度和 4 000 m 高度,邢台在 1 500 m和 3 000 m 高度出现谱宽高于其他高度的情况。这是由于石家庄 1 200 m 高度的谱分布由于有云的存在,相对湿度较大,相对湿度增大可以使谱型加宽[23];而在 4 000 m 由于处在第二层逆温层的底部,气溶胶粒子大量聚集在这一高度,其中包括有远距离输送的粗粒子气溶胶。邢台市 1 500 m正好是逆温层所在高度,低层气溶胶堆积在这一高度;而 3 000 m 同样是由于远距离输送的粗粒子导致的谱宽较宽。石家庄市和邢台市同一高度的气溶胶谱分布比较相似,但邢台的 4 000 m 高度粒子谱低于其他高度,可能是由于这一高度层恰好是第二层逆温层顶层,下面的粒子输送不到这一高度,而上面的粒子由于粒径较小无法降落所导致。

从气溶胶积聚模态和粗模态的垂直分布数浓度可以看出,积聚模态的粒子数浓度远高于粗模态,说明两地气溶胶主要以细粒子为主。在 1 700 m 之下,石家庄几乎都是细粒子,而邢台则是粗粒子和细粒子均有。

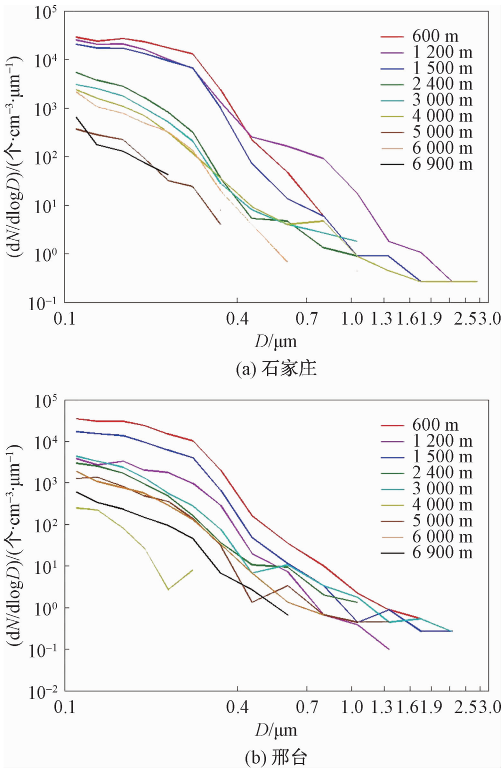


图 5 石家庄和邢台上空气溶胶粒子谱特征

Fig. 5 The spectrum distribution of aerosol particles over Shijiazhuang and Xingtai

2.3 气溶胶来源分析

采用 HYSPLIT 模式计算了 2013 年 9 月 30 日地区气团 48 h 后向轨迹(图 6)。后向轨迹显示,3 000 m高度处高空气溶胶粒子随气团从经中国内蒙、河套地区(9 月 29 日)远距离输送而来(浅蓝色和绿色线条)的清洁空气。1 500 m 高度处气溶胶多源自南边近地面污染物的排放(深蓝色线条),输送距离较短。而 500 m 高度处完全受偏南气团影响,污染程度较高,主要构成了高浓度的气溶胶细粒子。

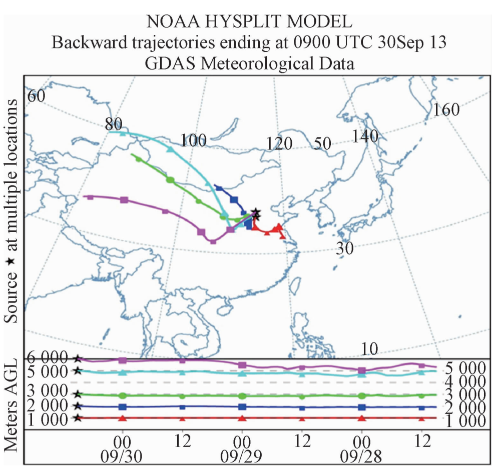


图 6 河北中南部地区气团 48 h 后向轨迹

Fig. 6 48 h air mass backward trajectories

2.4 气溶胶与 CCN 关系

图 7 给出了飞机在石家庄市和邢台市上空垂直爬升时云凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)的垂直分布廓线。整体来看,CCN 浓度垂直分布与气溶胶一样随高度增加而减小,同样逆温层的存在对其下的 CCN 有一定的累积效应。1 700 m 以下,石家庄市和邢台市上空 CCN 数浓度(过饱和度为 0.3%)最高浓度值分别达到 5 889 个/cm^3 和7 347 个/cm^3。1 300 m 以下石家庄市上空的 CCN 浓度值低于同高度邢台市上空的 CCN 浓度且在 1 300 m 降到最小浓度值 827 个/cm^3,主要因为在石家庄市上空 1 000 ~ 1 300 m 有云层的存在,CCN 活化形成云滴使得 CCN 浓度值减小,从而也表明云对 CCN 具有明显的消耗作用。

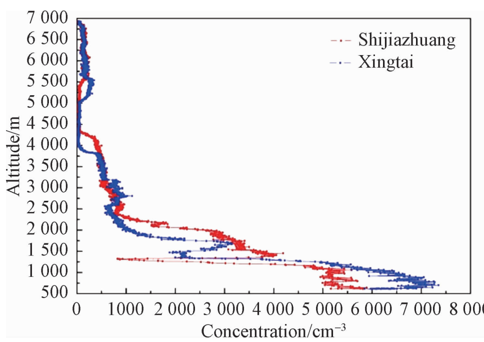


图 7 石家庄,邢台市上空 CCN 浓度垂直廓线

Fig. 7 The vertical profile of CCN concentration over Shijiazhuang and Xingtai

图 8(a)和图 8(b)是石家庄市和邢台市上空 600 ~ 6 900 m 垂直高度上的 CCN 数浓度与气溶胶的相关性,由于石家庄市 1 000 ~ 1 280 m 有淡积云的存在,因此去除了石家庄市 1 000 ~ 1 280 m 的 CCN 和气溶胶的数据。在两地上空垂直方向上,CCN 数浓度和气溶胶浓度具有很好的相关性,相关系数 R^2 分别为 0.97(石家庄)和 0.98(邢台)。

图 8(c)为石家庄上空云内 CCN 数浓度与气溶胶浓度的相关系数为 0.83,CCN 与气溶胶的相关性比较好,可以说明气溶胶转换成 CCN 的比较多,而 CCN 的增加使得云粒子有效半径 r_e 减小,进而导致云粒子碰并几率降低,云生命期延长。云生命期的延长,一方面会减少降水,不利于污染物的清除,另一方面通过反射更多短波辐射,冷却地表,进而引起地表辐射的改变,影响边界层高度。

由于石家庄市上空有层淡积云,云区在1 000 ~ 1 300 m,通过对云底以下(600 m),云中(1 200 m)和云顶以上(1 500 m)的气溶胶粒子进行简单分析,可以看出小粒径段气溶胶浓度随着高度增加而减小,云底以下 300 m 的气溶胶粒子谱宽较窄,云中和

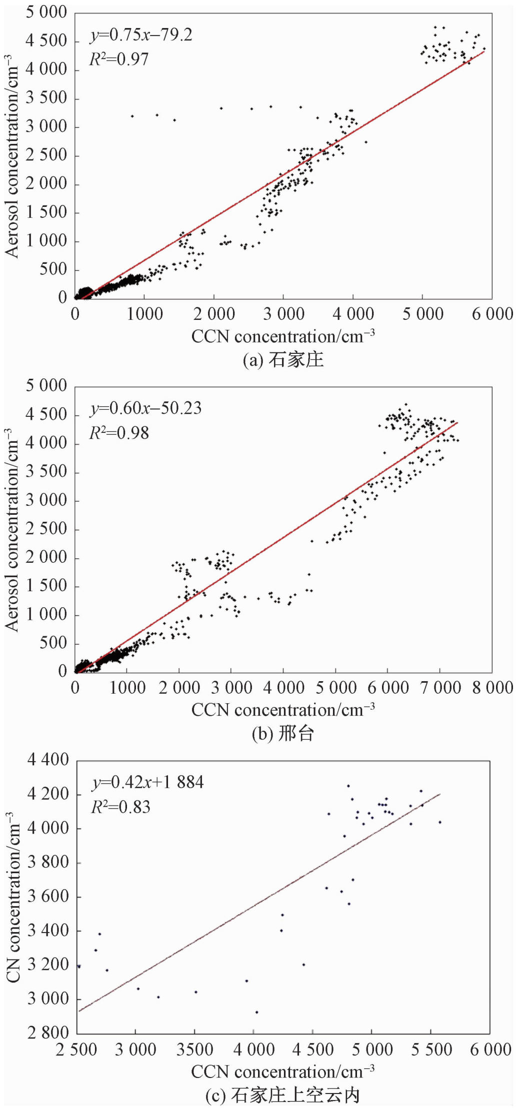


图 8　CCN 数浓度与气溶胶数浓度相关性

Fig. 8　The correlation between CCN concentration and aerosol concentration

云顶以上 300 m 的气溶胶粒子谱宽较宽,可能是因为气溶胶活化成为 CCN 之后进行吸湿增长,也可能是将小云粒子探测为气溶胶粒子。云中气溶胶粒子在 0. 4 ~ 2. 2 μm 之间的数浓度高于云下和云上(图 9),主要是气溶胶因吸湿增大造成大粒径(0. 8 ~ 3 μm)的气溶胶浓度整体偏高。

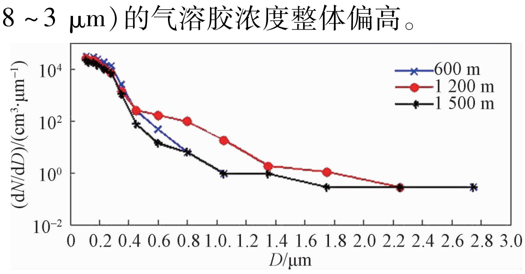


图 9　石家庄市上空云下、云中、云上气溶胶粒子谱特征

Fig. 9　Number size distribution characteristics of aerosol particles below, above and in the clouds over Shijiazhuang City

3　结论

(1)2013 年 9 月 30 日华北中南部重度霾期间,石家庄和邢台气溶胶粒子数浓度均随高度增加而减小;两个城市的积聚模态气溶胶粒子有效半径一般在 0. 05 ~ 0. 35 μm之间,粗模态气溶胶粒子有效半径一般在 0. 8 ~ 2. 2 μm 之间,气溶胶粒子数浓度比较接近,粒子有效半径大小比较相近。积聚模态的粒子数浓度远高于粗模态,两地气溶胶主要以细粒子为主。对两地的气溶胶来源进行 48 h 后向轨迹分析(图 7),可以看出 1 000 m 以下近地面的气溶胶来自局地排放,以城市群人类活动排放源为主,2 000 m以上的气溶胶主要是来自内蒙或者西北方向的远距离输送。

(2)当天两个城市上空均出现两层逆温,边界层逆温的出现会阻碍垂直输送,导致逆温层上下气溶胶分布不连续,气溶胶粒子在逆温层底部累积。两层逆温之间的气溶胶虽然随高度减小,但是变化幅度不大,基本在 500 个/cm^3 左右,其中积聚模态粒子数浓度随着高度的增加缓慢减小,粗模态粒子随着高度的增加而增加。

(3)气溶胶粒子谱分布特征显示,两地的气溶胶谱分布均是单峰分布,谱宽随着高度变窄,两个城市在同一高度的气溶胶谱分布比较相似,但是石家庄 1 200 m 高度的谱分布由于有云的存在,谱宽高于其他高度。

(4)通过分析两个城市上空 CCN 的垂直分布,发现 CCN 浓度垂直分布与气溶胶一样随高度增加而减小, 同样逆温层的存在对其下的 CCN 有一定的累积效应,在两地上空垂直方向上,CCN 数浓度和气溶胶数浓度具有很好的相关性,相关系数 R^2 分别为 0. 97(石家庄)和 0. 98(邢台)。石家庄上空云内 CCN 数浓度与气溶胶数浓度的相关系数 R^2 为 0. 83,CCN 与气溶胶的相关性比较好,可以说明气溶胶转换成 CCN 的比较多,而 CCN 的增加使得云粒子有效半径 r_e 减小,进而导致云粒子碰并几率降低,云生命期延长。

(5)通过对对云下(600 m),云中(1 200 m)和云上(1 500 m)的气溶胶粒子进行分析,发现云底以下 300 m 的气溶胶粒子谱宽较窄,云中和云顶以上 300 m 的气溶胶粒子谱宽较宽,可能是因为气溶胶活化成为 CCN 之后进行吸湿增长,也可能是将小云粒子探测为气溶胶粒子。云中气溶胶粒子在0. 4 ~ 2. 2 个/cm^3之间的数浓度高于云底以下和云顶以上,主要是气溶胶因吸湿增大造成大粒径的气溶胶浓度整体偏高。

参 考 文 献

1 吴 兑. 灰霾天气的形成与演化. 环境科学与技术, 2011; 34(3):157—161

Wu Dui. Formation and evolution of haze weather. Environmental Science & Technology, 2011; 34(3): 157—161

2 范 烨, 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 Ye, Guo Xueliang, Fu Danhong, *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

3 Kaufman Y J, Tanre D, Boucher O. A satellite view of aerosols in the climate system. Nature, 2002; 419(6903): 215—223

4 Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, *et al*. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. Science, 2001; 294(5549): 2119—2124

5 Twomey S. Pollution and the planetary albedo. Atmospheric Environment, 2007; 1251—1556

6 Schmeissner T, Krejci R, Ström J, *et al*. Analysis of number size distributions of tropical free tropospheric aerosol particles observed at Pico Espejo (4765 m a. s. l.), Venezuela. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011; 11(7): 3319—3332

7 Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York, John Wiley, 1998

8 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. 气象科学, 2014; 34(5): 581—590

Li Junxia, Yin Yan, Li Peiren, *et al*. Advances in research on mechanism and observation of impacts of aerosol on cloud and precipitation. Journal of the Meteorological Sciences, 2014; 34(5): 581—590

9 陈浩然, 谭涌波, 杨 忆, 等. 不同冰核核化过程对雷暴云微物理过程和降水的影响. 科学技术与工程, 2016; 16(8): 8—17

Chen Haoran, Tan Yongbo, Yang Yi, *et al*. Impact on precipitation and microphysical process in thunder cloud under different ice nucleation process. Science Technology and Engineering, 2016; 16(8): 8—17

10 吴 兑. 近十年中国灰霾天气研究综述. 环境科学学报, 2012; 32(2): 257—269

Wu Dui. Hazy weather research in China in the last decade: a review. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012; 32(2): 257—269

11 吴 兑, 廖碧婷, 吴 蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 2014; 34(1): 1—11

Wu Dui, Liao Biting, Wu Meng, *et al*. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014; 34(1): 1—11

12 杨 洋, 王洪磊, 侯雪伟, 等. 石家庄一次持续性霾过程形成原因及气溶胶垂直探空分析. 环境科学学报. 2017; 37(3): 824—832

Yang Yang, Wang Honglei, Hou Xuewei, *et al*. Characteristics and formation mechanism of a long-term haze episode and the vertical distribution of aerosol concentration in Shijiazhuang. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017; 37(3): 824—832

13 Levin Z, Gershon H, Ganor E. Vertical distribution of physical and chemical properties of haze particles in the Dead Sea valley. Atmospheric Environment, 2005; 39(2005): 4937—4945

14 孙玉稳, 段 英, 吴志会. 石家庄秋季大气气溶胶物理特征分析. 气象, 1996; 22(2): 40—43

Sun Yuwen, Duan Ying, Wu zhihui. The analysis of physics feature of aerosol particles in autumn over Shijiazhuang area. Meteorological Monthly, 1996; 22(2): 40—43

15 张 瑜, 银 燕, 段 英, 等. 石家庄地区夏季气溶胶飞机探测资料分析. 内蒙古气象, 2007; (5): 6—8

Zhang Yu, Yin Yan, Duan Ying, *et al*. An observational study of the aerosol distributions over Shijiazhuang area during summer. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2007; (5): 6—8

16 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 Junxia, Yin Yan, Li Peiren, *et al*. Aircraft measurements of aerosol spetial distribution properties in Shanxi Province in summer. China Environmental Science. 2014; 34(8): 1950—1959

17 李军霞, 银 燕, 任 刚, 等. 山西云凝结核时空分布特征观测研究. 中国环境科学, 2015; 35(8): 2261—2271

Li Junxia, Yin Yan, Ren Gang, *et al*. Observational study of the spatial-temporal distribution of cloud condensation nuclei in Shanxi Province, China. China Environmental Science, 2015; 35(8): 2261—2271

18 Whitby K T. The physical characteristics of sulfur aerosols. Atmospheric Environment, 1978;(12): 135—159

19 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. 高原气象, 2013; 32(5): 1308—1320

Sun Yuwen, Sun Xia, Yin Yan, *et al*. Observation study of aerosol over Mid-Western North China plain in autumn(October). Plateau Meteorology, 2013; 32(5): 1308—1320

20 胡向峰, 韩 洋, 董晓波. 一次霾条件下石家庄上空气溶胶的观测研究. 气象与环境科学, 2016; 39(3): 32—37

Hu Xiangfeng, Han Yang, Dong Xiaobo. Observational study on aerosol over Shijiazhuang in a haze day. Meteorological and Environmental Sciences, 2016; 39(3): 32—37

21 孙 霞, 银 燕, 孙玉稳, 等. 一次霾过程的气溶胶特征分析. 兰州大学学报(自然科学版), 2010; 46(增刊): 102—106

Sun Xia, Yin Yan, Sun yuwen, *et al*. Analusis of aerosol characteristics during the process of a haze. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010; 46(S): 102—106

22 Shi Lixin, Dong Xiaobo, Lu Feng, *et al*. Aircraft measurements of atmospheric aerosol over North China in autumn. Advanced Materials Research. 2013;726—731,1416—1421

23 杨 军, 周德平, 宫福久. 辽宁地区大气气溶胶粒子的垂直分布特征. 南京气象学院学报, 2000; 23(2): 196—203

Yang Jun, Zhou Deping, Gong Fujiu. Vertical distribution of atmospheric aerosol particles over Liaoning Province, China. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000; 23(2): 196—203

Microphysical Characteristics in the Vertical Direction of Atmospheric Aerosol Particles of North China during the Heavy Haze Process Background

DONG Xiao-bo[1,2], YANG Jun[1*], YANG Yang[2], LÜ Feng[2], FAN Gen-chang[2], HU Xiang-feng[2]

(College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology[1], Nanjing 210044, China;
Weather Modification Office of Hebei Province[2], Shijiazhuang 050021, China)

[**Abstract**] During the period of heavy haze in North China (September 30, 2013), aerosol particle distribution and the vertical distribution characteristics of aerosol and cloud condensing nuclei (CCN) were analyzed by using observational datasets from the aircraft of Cheyenne ⅢA. The results show that the aerosol number concentration in both areas decreases with the increase of height, the effective radius of aerosol particles in both cities is close to each other, the range of aerosol effective radius in the accumulation mode and the coarse mode are 0.05 ~ 0.35 μm and 0.8 ~ 2.2 μm, respectively. Two inversion layers appear in and above the boundary layer, with a significant increase in the aerosol concentration below the inversion layers. The analysis of aerosol back trajectories indicates that the aerosol at the height of 3 000 m is mainly controlled by long transportation of the air mass, the aerosol at 1 500 m is mainly from the south side of the ground pollutant with a short transport distance, the aerosol at the height of 500 m is affected by the southern air mass with a high concentration of aerosol fine particles. The profiles of CCN shows that the number concentration of CCN decreases as the height increases, and the presence of inversion layer has a cumulative effect on CCN. Then the relationship between aerosol and CCN in both cities has been studied, the result shows that correlation coefficient of aerosol-CCN in both areas is above 0.95, while the correlation coefficient in clouds is just 0.83, and the number concentration of CCN in clouds is lower than outside, which indicates that the consumption of CCN in the activation of cloud droplets. The width of aerosol particles spectrum is narrow below cloud base, and is large in clouds or above cloud top height.

[**Key words**] haze aerosol CCN aircraft measurements North China