

北京上甸子典型天气个例的大气气溶胶数谱分布特征

沈小静¹ 孙俊英¹ 张养梅¹ 张璐¹ 周怀刚² 周礼岩² 董璠³

(1 中国气象科学研究院大气化学重点开放实验室, 北京 100081; 2 北京市密云县气象局, 北京 101500;

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要: 使用差分淌度粒径分析仪 (TDMPMS) 和空气动力学粒径分析仪 (APS) 对上甸子区域本底站气溶胶 (直径 3nm ~ 10 μ m) 数谱分布特征进行观测。利用2008年的观测结果, 分析了不同天气 (包括沙尘天气、干洁天气和雾霾天气) 条件下大气气溶胶数谱分布及其与气象要素和气团来源的关系。结果表明, 沙尘天气条件下, 上甸子站受西北方向的气团控制, 风速较大, 粗粒子数浓度明显增加, PM₁₀的质量浓度可以迅速增加到毫克每立方米 (mg · m⁻³) 的量级。典型的“香蕉型”新粒子生成事件通常发生在比较干洁晴朗的天气条件下, 西北气团主导, 大气中背景气溶胶数浓度较低, 核模态气溶胶数浓度迅速增长, 气溶胶的粒径呈现明显的增长过程, 核模态可以平稳地增长到约80nm, 达到成为云凝结核的尺度。雾霾天气通常是在西南气团影响下, 细颗粒物 (1 μ m以下) 不断累积、相对湿度不断升高的条件下发生的。雾霾天气条件下数谱分布的几何中值粒径出现在积聚模态, 积聚模态数浓度也高于非雾霾天。个例研究表明, 雾霾天气条件下, PM_{2.5}质量浓度可以达到非雾霾天的10倍左右, 其中以细颗粒物的贡献为主。在雾霾天气条件下, 上甸子站数浓度较高的积聚模态颗粒物主要来自城区的传输, 因此对背景地区气溶胶数谱的研究可以为解析城区气溶胶复杂来源提供依据。

关键词: 沙尘天气, 干洁天气, 雾, 霾, 气溶胶数谱分布, 新粒子生成事件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.004

The Characteristics of Particle Number Size Distribution under Typical Meteorological Conditions at Shangdianzi Regional Station in Beijing

Shen Xiaojing¹, Sun Junying¹, Zhang Yangmei¹, Zhang Lu¹, Zhou Huaigang², Zhou Liyan², Dong Fan³

(1 Key Laboratory of Atmospheric Chemistry of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Miyun Meteorological Station, Beijing 101500 3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological

Administration, Beijing 100089)

Abstract: By using the instruments of Twin Differential Mobility Particle Sizer (TDMPMS) system and an Aerodynamic Particle Sizer, measurements of particle number size distribution (PNSD) in the range of 3 nm~10 μ m were taken at Shangdianzi Regional Station. Based on the dataset in 2008, the characteristics of particle number size distribution under different meteorological conditions such as dust storms, new particle formation events and haze days were investigated. On a dust storm day, the air mass originated from the northwest, with high wind speed. The coarse mode particle number concentration increased sharply and PM₁₀ mass concentration could reach up to milligrams per cubic meter. A new particle formation event of a typical “banana shape” occurred when the atmosphere background was quite dry, clean and clear, with the air mass coming from the northeast. The nucleation mode particle could grow to a larger size, around 80 nm, having the potential to be activated as cloud condensation nuclei. A haze day usually occurred when southwest air mass arrived, along with the meteorological conditions of high humidity. The conditions favored fine particles (<1 μ m) accumulating. The case study showed that the PNSD on a haze day was dominated by the accumulation mode and

higher number concentration than a non-haze day. The mass concentration of PM_{2.5} could increase by 10 times on a haze day, which was mainly attributed to fine particles. On haze days, the accumulation mode particles, with a high number of concentration were mainly transported from the urban area. Thus the study of PNSD at rural sites could also provide information for analyzing the complex emission sources in the urban area.

Keywords: dust storm, dry and clean day, fog, haze, particle number size distribution, new particle formation event

收稿日期: 2013年7月17日; 修回日期: 2013年9月11日

第一作者: 沈小静 (1984—), Email: xjshen@cams.cma.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究发展计划 (2011CB403401);

国家自然科学基金 (41175113)、公益性行业

(气象) 科研专项 (GYHY200906038, GYHY

201206037); 中国气象科学研究院基本科研业务

费项目 (2010Z002, 2013Y004)

1 引言

大气气溶胶，也称大气颗粒物，是大气中重要的微量成分，通过吸收和散射太阳辐射直接影响气候^[1]，又可通过形成云凝结核间接影响气候^[2]。很多研究表明，大气中颗粒物和人类健康有重要关系，尤其是粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的超细粒子^[3]。气溶胶在大气环境中的行为取决于其化学成分、粒径大小及其谱分布特征。根据气溶胶粒子的粒度谱分布特征，可以了解大气颗粒物的来源，为治理颗粒物污染提供依据^[4]。目前，全球范围内开展了大量有关颗粒物数谱分布的观测，主要集中在欧美地区，如德国莱比锡^[5]、芬兰赫尔辛基^[6]、美国亚特兰大等^[7]。莱比锡城市大气颗粒物数浓度冬季高于夏季，工作日高于非工作日^[5]。城市大气颗粒物数谱分布主要受交通源影响，清洁背景地区颗粒物数谱分布受新粒子形成的影响十分明显^[6]。观测结果表明， $10\sim 100\text{nm}$ 和 $100\sim 2000\text{nm}$ 颗粒物数浓度夜间较高，在交通早高峰时达到最大值， $3\sim 10\text{nm}$ 颗粒物数浓度在11—14时达到最大值^[7]。

气象条件对颗粒物数谱分布也有重要的影响。Birmili等^[8]发现来源于大陆和海洋的气团对Melpitz颗粒物数谱分布的影响不同，来自大陆的气团对应的积聚模态粒子较多。对于芬兰的两个观测站Värriö和Hyytiälä^[9]，来自西南方向俄罗斯境内和中欧的气团携带的积聚模态颗粒物数浓度比来自极地方向的气团要高。这是由于积聚模态颗粒物的生命史较爱根核模态和核模态长，由于碰并和凝结增长，核模态在大气中仅存在几个小时就会消失，而粗粒子一般只能运输十几千米就会沉降^[10]。颗粒物数浓度还受局地混合作用的影响，如果边界层稳定，局地排放和再悬浮的颗粒物会相对较少^[11]。季节的变化也影响颗粒物的数谱分布，春季冰雪解冻，有利于沙尘天气的发生^[12]，粗粒子模态较其他季节要高。Boy等^[13]研究表明较强的紫外辐射、低相对湿度和低温度有利于新粒子生成事件的发生。近年来国内针对北京开展的大气气溶胶粒度谱分布的研究取得了一定进展。张仁健等^[14]用尘埃粒子计数器测量 $0.3\mu\text{m}$ 以上的粒子数浓度，峰值出现在 $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ ，其数浓度峰值与相对湿度有密切关系。胡敏等^[15]使用TDMPS-APS系统在线测量北京城区夏季颗粒物的数浓度谱分布， $3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒物总数浓度的变化范围是(10min平均值) $(0.7\sim 6.4)\times 10^4\text{cm}^{-3}$ ，平均值为 $(3.0\pm 0.8)\times 10^4\text{cm}^{-3}$ ，并且夏季高温高湿条件下主要是细粒子的污染，导致极低的能见度。

上甸子区域本底站自2008年3月开展大气气溶胶数谱分布($3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$)的观测，已有的研究结果表

明^[16]，上甸子地区大气气溶胶 $3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 数浓度平均值为 12000cm^{-3} ，核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子平均数浓度分别是3600、4400、3500和 2cm^{-3} 。颗粒物数浓度的季节变化表现为春季较高，主要与春季新粒子生成事件多发有关。上甸子地区新粒子生成事件的发生频率为36%，成核速率为 $0.7\sim 72.7\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ，增长速率 $0.3\sim 14.5\text{nm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。后向轨迹分析表明，来自西北方向的干洁气团有利于新粒子生成事件，来自西南方向的污染气团有利于积聚模态颗粒物的累积。本研究主要以2008年的数谱分布资料为基础，主要分析不同类型天气条件下的数谱分布特征。

2 观测点和采样方法

北京上甸子大气本底监测站是我国建立的第一个区域性大气本底站，其经纬度为 $117^{\circ}07'\text{E}$ ， $40^{\circ}39'\text{N}$ ，海拔293m，位于北京东北部的密云县内，距离北京市约100km，站点周围无明显污染源。作为华北地区的区域性大气本底站，该站的北侧很少有大城市和其他污染源，北京城区位于其西南方，在东南方向有天津、塘沽等城市和工业区(图1)。从一定程度上说，上甸子本底监测站的观测资料反映了京津唐乃至整个华北地区的大气颗粒物的平均状况。

大气颗粒物数谱分布使用两个差分淌度粒径分析仪(Twin Differential Mobility Particle Sizer, TDMPS)和空气动力学粒径分析仪(Aerodynamic Particle Sizer, APS)同步在线连续测量。TDMPS系统由2个子系统组成：超细微分迁移率分析仪(Ultrafine Differential Mobility Analyzer, UDMA)和超细凝聚粒子计数器(Ultrafine Condensation Particle Counter, UCPC, TSI Model 3025)，测量粒径范围为 $3\sim 80\text{nm}$ 的颗粒物；微分迁移率分析仪

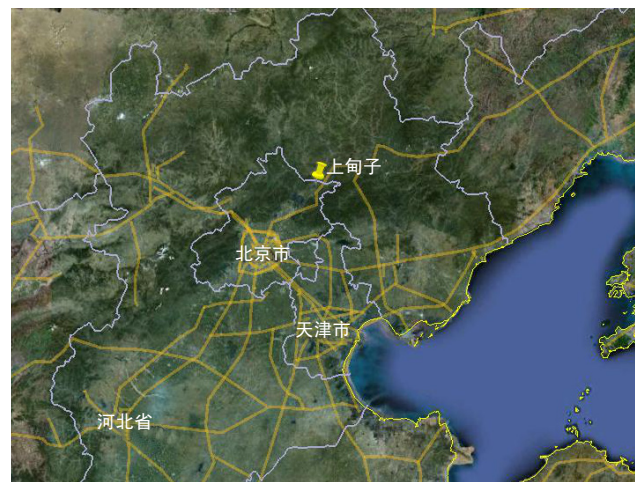


图1 上甸子观测站的地理位置(黄色实线代表主要公路分布, 图片来自Google Earth)

(Differential Mobility Analyzer, DMA) 和凝聚粒子计数器 (Condensation Particle Counter, CPC, TSI Model 3010), 测量粒径范围为 $40\sim 850\text{nm}$ 的颗粒物。TDMPs 是根据颗粒物在电场中的迁移特性不同, 在 DMA (UDMA) 中将不同粒径的颗粒物分开, 然后颗粒物进入 CPC (UCPC) 进行计数, 从而得到大气颗粒物数浓度谱分布。大气样品进入系统后分为两路, 一路通过 UDMA 筛选粒径后进入 UCPC 计数, 样品流量为 $2\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 鞘气流量为 $20\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; 另一路通过 DMA 进入 CPC 计数, 样品流量为 $0.5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 鞘气流量为 $5\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。APS 测量 $0.5\sim 10\mu\text{m}$ 粒子的粒径分布, 样品流量为 $1\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, 鞘气流量为 $4\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。这套系统的时间分辨率为 10min , 并且样品气溶胶进入仪器观测之前经过干燥系统, 将相对湿度控制在 40% 以下。观测到的大气气溶胶数谱分布根据其粒径大小可以分为四个模态^[17], 核模态 ($3\sim 25\text{nm}$)、爱根核模态 ($25\sim 100\text{nm}$)、积聚模态 ($100\sim 1000\text{nm}$) 和粗粒子模态 ($>1\mu\text{m}$)。

气象资料来源于自动气象站测得的小时平均资料, 包括风速、风向、温度和湿度等。后向轨迹分析利用 HYSPLIT 软件 (<http://www.arl.noaa.gov/>)^[18]。本文所用的时间如无特殊说明均指北京时间。

3 结果与讨论

本研究主要以 2008 年的数谱分布资料为基础, 从中挑选能够代表典型天气条件下的数谱信息加以分

析, 分别讨论沙尘天气、干洁大气 (有新粒子生成事件发生的情况)、雾霾情况下的数谱分布特征。

3.1 沙尘天气

2008 年共有 7 天观测到比较明显的沙尘事件, 分别是 3 月 1 日、18 日, 5 月 20、21、27—29 日, 以 3 月 18 日发生的沙尘事件为例讨论沙尘天气的数谱分布特征。该次事件是 2008 年入春以来出现的范围较大、影响明显的一次沙尘天气。图 2 是 3 月 18 日 $3\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒物数谱分布、各模态颗粒物数浓度及气象条件的变化。从图 2a 和 b 可以看到, 粗粒子 ($>1\mu\text{m}$) 从 08 时开始增加, 粗粒子数浓度从几个每立方厘米急剧增加到约 200cm^{-3} 。而爱根核模态和积聚模态有明显的下降。从气象条件上看 (图 2c), 08 时左右风速从 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 迅速增加至 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向由东风转为北风。10 时后粗粒子模态在数谱分布中开始降低, 16 时左右逐渐消失, 此时的风速也减小至 $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。在沙尘天气结束后, 核模态颗粒物数浓度在 15 时左右突然增加, 这时的大气气溶胶背景数浓度很低, 约 2000cm^{-3} , 凝结汇约为 0.01s^{-1} , 有利于新粒子生成事件的发生, 但可能由于大气中参与核模态增长的可凝结蒸汽浓度过低, 因此, 核模态无法长大到爱根核模态, 没有看到爱根核模态随后的增加, 核模态很快在大气中因碰并作用而消失。

本次沙尘事件主要受南下冷空气影响, 3 月 17 日夜间至 18 日, 华北、西北、内蒙古等多处地方遭遇扬

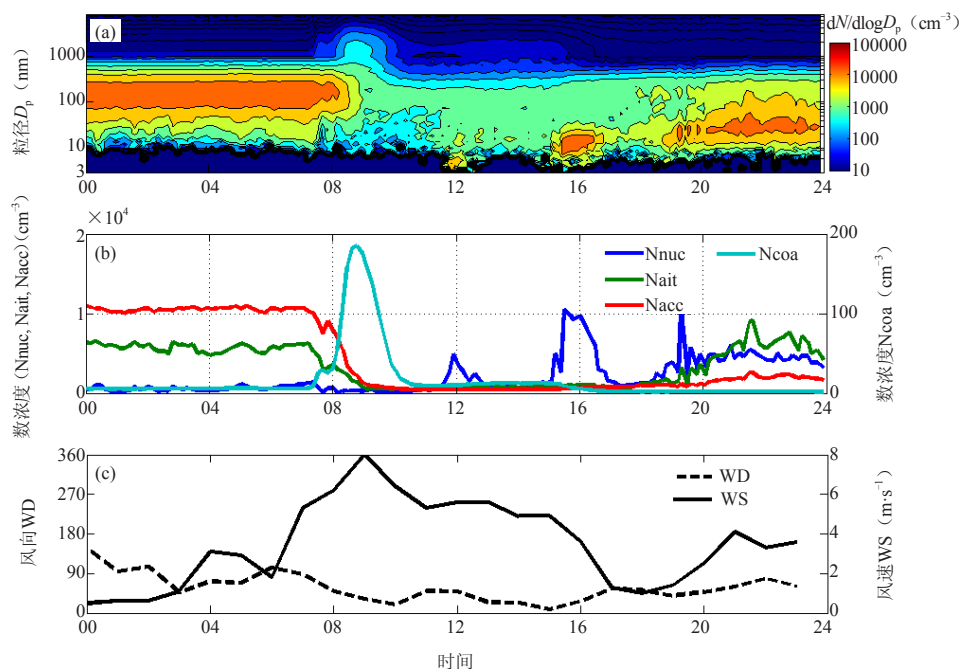


图2 2008年3月18日沙尘天气情况下数谱分布 (a)、不同模态颗粒物数浓度 (b) 和气象条件日变化 (c)

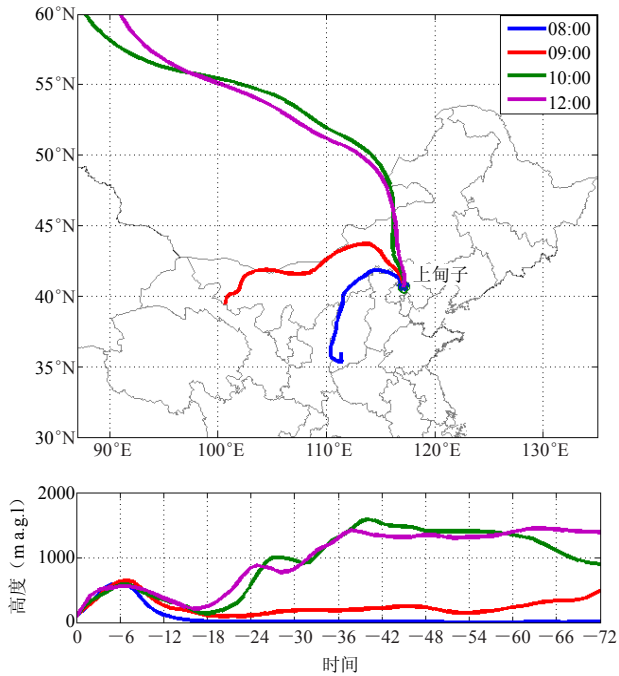


图3 2008年3月18日08时、09时、10时和12时到达上甸子的气团轨迹及其运行高度

沙天气。图3气团轨迹分析表明3月18日08时，气团主要来自西南方向，运行高度较低，运行速度慢，有利于污染物的累积。因此，08时之前，上甸子气溶胶数谱分布以积聚模态为主，数浓度达到 10000cm^{-3} 。在粗粒子出现之前，假定气溶胶密度为 $1.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，根据数谱分布可以计算出 PM_{10} 质量浓度约为 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从

09时开始，气团已经开始转变为西方，来自内蒙古境内的沙尘到达上甸子站。10时之后，气团来自遥远的中东和俄罗斯地区，主要是干洁的气团，上甸子站粗粒子数浓度明显下降，表明沙尘事件已经结束。在粗粒子增加期间，根据文献[19]中给出的沙尘气溶胶的密度为 $2.5\sim 2.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，假定粗粒子的密度是 $2.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，计算得到这时 PM_{10} 质量浓度可以增长到约 $2.8\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3.2 干洁天气

根据上甸子数谱数据的统计分析，新粒子生成事件通常发生在相对湿度较低 ($<40\%$)，西北气团主导的干洁大气条件下^[15]。图4为典型的新粒子生成事件数谱分布、各模态颗粒物数浓度及气象条件的变化，该典型事件发生在2008年3月13日。新粒子生成事件的判断标准及有关特征参数，如成核速率、增长速率、凝结汇等的计算方法主要参考Dal Masso等的结果^[17]。从图中可以看出，新粒子生成事件从08时左右开始，此时背景颗粒物数浓度较低，凝结汇CS小于 0.01s^{-1} 。核模态数浓度在2h内急剧增加到 $7\times 10^4\text{cm}^{-3}$ (图4b)。15时左右核模态数浓度开始降低，20时左右核模态基本消失。在核模态降低的过程中，爱根核模态数浓度逐渐开始增长 (图4b)，大约滞后核模态数浓度增长6h，这个过程中核模态颗粒物逐渐长大为爱根核模态。而爱根核模态颗粒继续增长，成为积聚模态，积聚模态数浓度的增长滞后于爱根核模态大约5h，颗粒物粒径增长持续进行。该

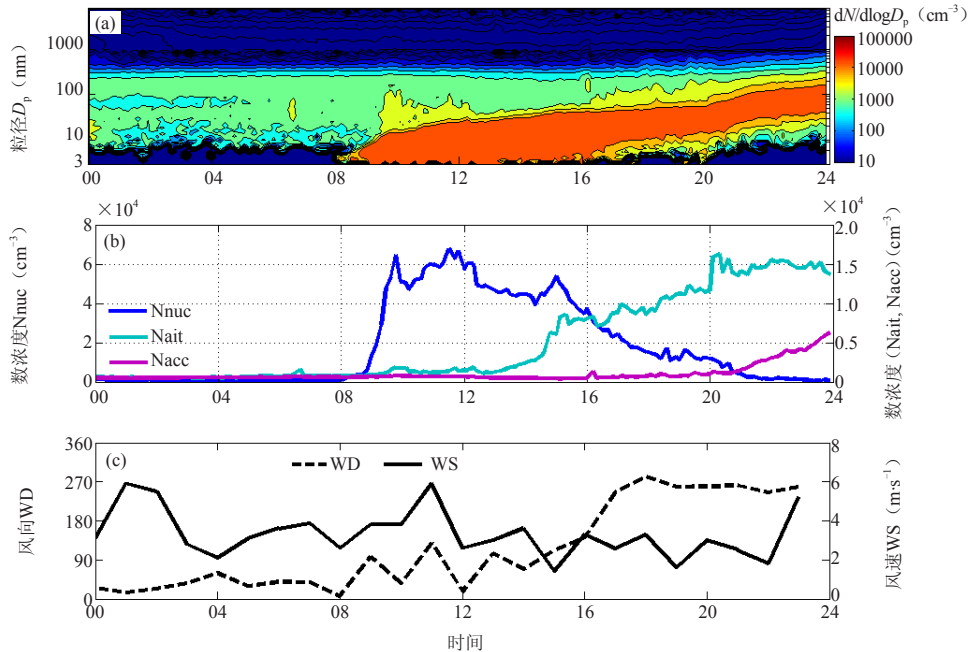


图4 新粒子生成事件条件下数谱分布 (a)、不同模态颗粒物数浓度 (b) 和气象条件日变化 (c)

次新粒子生成事件成核速率 $14.9\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ，增长速率 $3.8\text{nm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，增长速度比较缓慢并且持续时间较长。从气象条件来看（图4c），风速主要在 $2\sim 4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，最高达到 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而风向由东北风主导，18时后转变为西风。由于白天局地地面风向基本维持在东北方向，利用后向轨迹计算地面100m处的气团主要是来自西北方向（图5）比较干洁的气团，经过俄罗斯东北部、蒙古、内蒙古等地区，并且气团全天没有发生变化。核模态颗粒物在气团均一的情况下呈现“香蕉型”的增长趋势，可以长大到80nm左右，达到作为云凝结核的尺度。

3.3 雾霾天气

大气气溶胶浓度的增加导致的持续性雾霾天气和重污染过程逐渐增多，引起科技人员和公众的高度关注。在气象学上，雾和霾是根据空气的相对湿度来进行区分的，相对湿度大于95%时发生的能见度低于1km的现象称为雾，相对湿度在80%以下能见度低于10km的现象称为霾。在80%~95%的相对湿度之间的低能见度现象则是雾和霾共同作用的结果。雾是由大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统，是近地面层空气中水汽凝结（或凝华）的产物。霾是大气中的沙尘、硫酸盐、硝酸盐、有机物等组成的气溶胶系统造成能见度下降的现象。通常情况下，雾和霾在一天之中可以变化角色或者同时存在，这种区域性能能见度低于10km的空气普遍浑浊的现象就

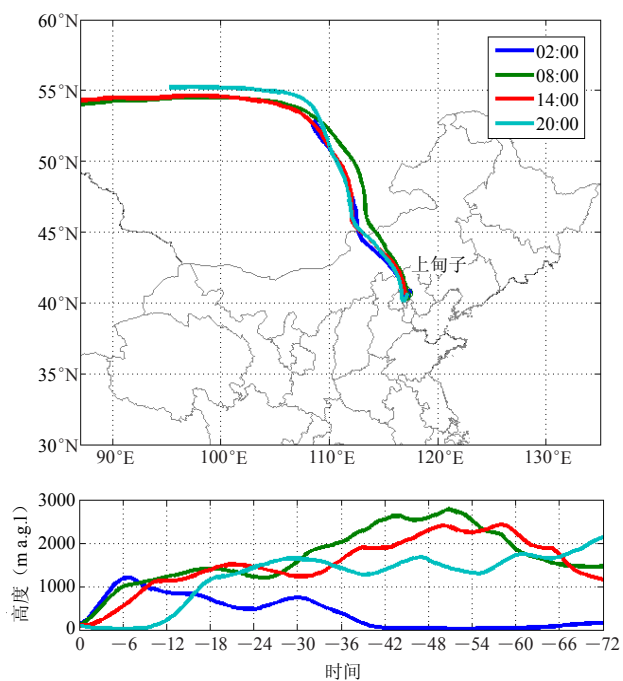


图5 2008年3月13日02时、08时、14时和20时到达上甸子的气团轨迹及其运行高度

被称之为“雾霾”。

2008年5月1—3日出现了较为典型的雾霾天气。是一次典型的大气由清洁变为污染，再变为清洁的过程。从数谱分布变化来看（图6），5月1日09时之前，颗粒物数浓度较低，核模态、爱根核模态和积聚模态数浓度分别约为 2000 、 2000 和 1500cm^{-3} 。09时开始，核模态颗粒物有急剧增加，爱根核模态也随后增加，可以认为是一次新粒子生成事件。与此同时，积聚模态颗粒物数浓度也有明显的增加，达到 10000cm^{-3} 。由于积聚模态数浓度增加，对核模态和爱根核模态颗粒物的碰并作用增强，因此在12时左右大气中的核模态颗粒物被清除，爱根核模态数浓度也开始下降，新粒子生成后的增长过程被抑制。从气象条件来看（图7），08时之前风向以东北方向为主，风速为 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，08时之后风向转变为西南方向，风速最大可以达到 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，来自西南方向的气团造成污染物在上甸子地区的累积。从轨迹分析的结果来看（图8），5月1日白天气团主要来自南方，经过山东、河北等颗粒物排放较多的地区到达上甸子。通过数谱积分计算 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度（假设颗粒物密度 $1.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ），09时左右质量浓度可以急剧增加到 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最高值出现在16时，达到 $270\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，而积聚模态数浓度增加前 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度大约 $20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，可见由于气团变性造成的污染可以使 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度增加10倍左右。污染气团维持了颗粒物质量浓度的高值，而污染发生之前（5月1日10时之前）和之后（5月3日06时之后）气团主要来自干净的西北地区。

5月2日MICAPS海平面气压场显示地面受均压场控制（图略），不利于污染物的扩散。00—12时期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度一直维持在 $220\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右，08时之后随着太阳辐射的增强，气温升高、相对湿度下降（图7），雾滴蒸发后大量相对较干的气溶胶造成的低能见度形成了霾。12时以后 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度缓慢下降，这时风向也由西南风转为东南风，风速低于 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。15时开始风向又转为西南风，随着太阳辐射减弱，气温降低、相对湿度增加。随着相对湿度的增加，霾向雾霾共存转变的过程中， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度逐渐增加到 $300\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。21时之后相对湿度达到80%以上，一直持续到次日06时，期间风向转为东北风， $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度缓慢降低，但一直维持在 $200\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上，主要是夜间边界层稳定，不利于污染物扩散。06时之后 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度也迅速降低，主要是太阳辐射增强后，夜间稳定的逆温层被打破，边界层逐渐发展，并且气团轨迹分析表明，5月3日白天气团来自西北

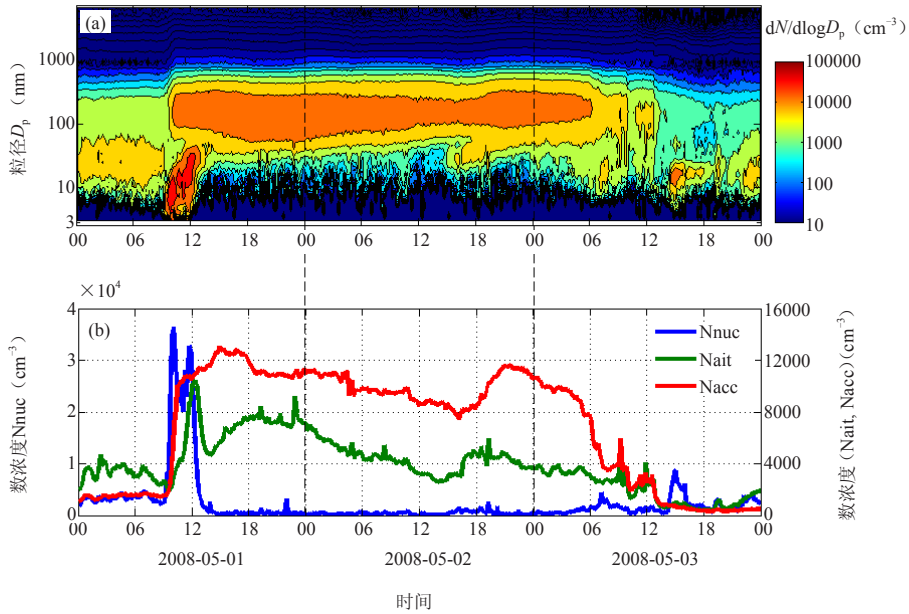


图6 污染及雾霾天气条件下数谱分布 (a) 和不同模式颗粒物数浓度 (b)

方向 (图8), 干洁气团和近地面层的污染空气混合, 导致了大气气溶胶质量浓度和积聚模态颗粒物数浓度的降低。

3.4 小结

沙尘天气时对应的核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子模态平均颗粒物数浓度分别为1100、2400、3600和 30cm^{-3} 。气团主要来自西北方向, 相对湿度低于30%, 风速为 $2\sim 9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。干洁天气对应的气团主要来自西北方向, 发生频率约60%, 相对湿度低于40%, 风速适中, 为 $2\sim 6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。干洁天气下新粒子生成事件发生频率较高, 约为50%, 对应的核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子模态数浓度分别为4200、4300、2200和 3cm^{-3} 。雾霾天气发生时通常对

应西南方向气团, 相对湿度在60%以上, 有时甚至达到80%以上, 风速比较低, 天气形势静稳。观测期间西南方向的气团约占40%, 其中雾霾天约占60%。雾霾天气条件下对应的核模态、爱根核模态、积聚模态和粗粒子模态数浓度分别为1200、3800、4800和 2cm^{-3} (表1)。相比之下, 雾霾天气条件下积聚模态颗粒物数浓度最高, 干洁天气条件下核模态和爱根核模态数浓度较高, 而沙尘天气表现为粗粒子模态数浓度有明显增加。

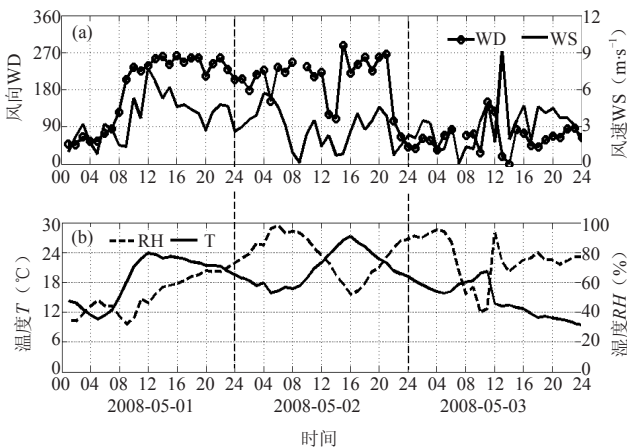


图7 2008年5月1—3日风向和风速 (a)、温度和相对湿度 (b) 的日变化

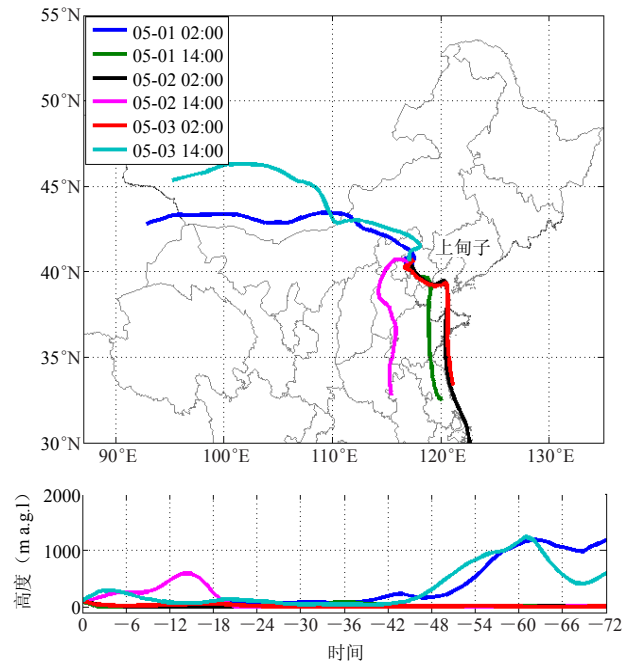


图8 2008年5月1—3日到达上甸子的气团轨迹及其运行高度

表1 不同天气条件下气溶胶各模态的浓度水平及气象条件

天气现象	核模态 (cm^{-3})	爱根核模态 (cm^{-3})	积聚模态 (cm^{-3})	粗粒子模态 (cm^{-3})	气团来源	气象条件
沙尘天气	1100	2400	3600	30	西北	$RH < 30\%$; 风速 $2 \sim 9 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
干洁天气	4200	4300	2200	3	西北	$RH < 40\%$; 风速 $2 \sim 6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
雾霾天气	1200	3800	4800	2	西南	$RH > 60\%$; 风速约 $2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

4 结论与展望

本文基于对北京上甸子区域本底站大气气溶胶数谱分布的观测资料,分析了不同天气(沙尘天气、干洁天气和雾霾天气)条件下的数谱分布特征,可以得出如下结论。

(1) 在沙尘天气条件下,受到来自内蒙古方向沙尘源区运行较快的气团影响,大气中的粗粒子数浓度有明显增加,增加的幅度可以达两个数量级(即数浓度水平从几个到上百个每立方厘米),而 PM_{10} 质量浓度可以增加10倍左右。

(2) 典型的新粒子生成事件发生日通常为晴朗的干洁天气,新粒子生成之前数浓度较低,约 2000cm^{-3} ,凝结汇小于 0.01s^{-1} 。在来自西北方向气团的稳定的控制之下,有利于核模态的持续增长,容易观测到典型的“香蕉型”新粒子生成事件。

(3) 雾霾天气现象发生时通常是受西南方向气团的影响,大气相对湿度较高,多出现在夜间,边界层较低并且稳定,有利于颗粒物不断累积,从而形成雾和霾共存的情况。白天,边界层混合作用加强,相对湿度较低,在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度较高的情况下,容易形成霾。雾霾天气条件下对颗粒物质量浓度起主要贡献的是处于积聚模态的细颗粒物。

(4) 比较而言,雾霾天气条件下积聚模态颗粒物数浓度最高,干洁天气条件下核模态和爱根核模态数浓度较高,而沙尘天气表现为粗粒子模态数浓度有明显增加。雾霾天气对应的通常是相对湿度较高,风速较小的西南气团;干洁天气和沙尘天气主要对应的是来自西北方向、湿度较低的气团。

气溶胶在大气环境中的行为取决于其化学成分、粒径大小及其谱分布特征。纵观不同天气条件下气溶胶数谱分布的特征,可以了解到当区域本底地区气溶胶以积聚模态为主时,受北京城区的影响比较大,与污染物的长距离输送有关。背景地区大气颗粒物数谱分布的研究对解析城区大气颗粒物复杂来源有重要意义。

致谢:感谢上甸子区域本底站观测人员在仪器日常维护、运行和数据获取方面的辛勤劳动。

参考文献

- [1] Schwartz S E. The Whitehouse effect-Shortwave radioactive forcing of climate by anthropogenic aerosols: An overview. *J Aero Sci*, 1996, 27: 359-382.
- [2] Twomey S A, Piepgrass M, Wolfe T L. An assessment of the impact of pollution on global cloud albedo. *Tellus*, 1984, 36B: 356-66.
- [3] Dockery D W, Pope C. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health*, 1994, 13: 107-132.
- [4] 陈义珍, 柴发合, 魏强. 北京市冬季气溶胶粒子尺度谱分布研究. *安全与环境学报*, 2006, 6(1): 80-84.
- [5] Weher B, Wiedensohler A. Long term measurements of submicrometer urban aerosols: Statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases. *Atmos Chem Phys*, 2003, 3: 867-879.
- [6] Hussein T, Puustinen A, Aalto P P, et al. Urban aerosol number size distributions. *Atmos Chem Phys*, 2004, 4: 391-411.
- [7] Woo K S, Chen D R, Pui D Y H, et al. Measurement of Atlanta aerosol size distributions: Observation of ultrafine particle events. *J Aerosol Science and Technology*, 2001, 34(1): 75-87.
- [8] Birmili W, Wiedensohler A, Heintzenberg J. Atmospheric particle number size distribution in central Europe: Statistical relations to air masses and meteorology. *Geophys Res*, 2001, 106: 32005-32018.
- [9] Kulmala M, RannikÜ, Pirjola L, et al. Characterization of atmospheric trace gases and aerosol composition at forest sites in southern and northern Finland using back trajectories. *Bor Env Res*, 2000, 5: 315-336.
- [10] Mäkelä J M, Hämeri K, Väkevä M, et al. On the spatial scale of the new aerosol particle formation in southern Finland. *Journal of Aerosol Science*, 1998, 29: S215- S216.
- [11] Väkevä M, Hämeri K, Mäkelä J. Effects of meteorological processes on aerosol particle size distribution in an urban background area. *Journal of Geophysical Res*, 2000, 105: 9807-9821.
- [12] Venzac H, Sellegri K, Villani P, et al. Seasonal variation of aerosol size distributions in the free troposphere and residual layer at the puy de Dome station, France. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 1465-1478.
- [13] Boy M, Kulmala M. Nucleation events in the continental boundary layer: Influence of physical and meteorological parameters. *Atmos Chem Phys*, 2002, 2(1):1-16.
- [14] 张仁健, 王明星, 等. 北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究. *气候与环境研究*, 2003, 5(1): 5-88.
- [15] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响. *环境科学*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- [16] Shen X J, Sun J Y, Zhang Y M, et al. First long-term study of particle number size distributions and new particle formation events of regional aerosol in the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 1565-1580.
- [17] Dal Maso M, Kulmala M, Riipinen I, et al. Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: Eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland. *Boreal Environment Research*, 2005, 10(5): 323-336.
- [18] Draxler R R, Hess G D. An overview of Hysplit_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, 47: 295-308.
- [19] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J Geophys Res*, 2001, 20: 255-273.