

李星敏,陈闯,董自鹏,等,2018. 关中颗粒物粒径谱特征及其气象影响因子分析[J]. 气象,44(7):929-935.

## 关中颗粒物粒径谱特征及其气象影响因子分析<sup>\*</sup>

李星敏 陈 闯 董自鹏 董 妍 杜川利 彭 艳

陕西省气象科学研究所,西安 710014

**提 要:** 利用西安泾河和长安的气象观测资料、陕西秦岭大气科学试验基地气溶胶粒子谱观测资料及西安市环境保护局颗粒物质量浓度观测资料,分析了气象条件对关中颗粒物粒径谱的影响,结果表明:关中特殊的地形影响和严重的颗粒物污染是霾易发的主要原因;混合层高度与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度具有较明显的负相关关系,秋、冬季混合层高度高有利于颗粒物污染的扩散。不同方向上风速变化对颗粒物浓度的影响体现了西北气流对关中颗粒物污染的扩散作用和偏东气流对颗粒物污染的输送。高相对湿度有利于稳定层结的维持和污染物集聚,当相对湿度 $\leq 80\%$ 时,粒径在  $150\text{ nm}\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$  的粒子的数浓度,随着相对湿度的增大明显增加,对降低能见度、形成雾-霾有重要作用。不同粒径段粒子的数浓度随相对湿度的变化不同,对能见度的影响也不同;相对湿度越大,湿度对降低能见度的贡献越大。

**关键词:** 粒径谱,颗粒物污染,气象因子

**中图分类号:** P427,X511

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.008

## Analysis of the Impact of Meteorological Factors on Particle Size Distribution and Its Characteristic over Guanzhong Basin

LI Xingmin CHEN Chuang DONG Zipeng DONG Yan DU Chuanli PENG Yan

Meteorological Institute of Shaanxi Province, Xi'an 710014

**Abstract:** The impact of meteorological factors on particle size distribution and its characteristic over Guanzhong Basin (GZB) was studied by employing the particulate matter (PM) mass concentration data released by Xi'an Environmental Protection Bureau, the meteorological station data and the particle size distribution data measured by aerodynamic particle sizer (APS) and Scanning Mobility Particle Sizer Model 3034 (SMPS). The result showed that heavy haze frequently occurring in GZB is mainly caused by complex special terrain and high levels of particulate pollutants. Significant negative correlations were found between planetary boundary layer height (PBLH) and mass concentrations of PM with aerodynamic diameters  $< 2.5\text{ }\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ), suggesting that a higher PBLH is favorable for the diffusion of particulate pollutants. Changes in  $\text{PM}_{2.5}$  in response to wind speed and wind direction was simultaneously investigated, clearly showing that easterly (northwesterly) wind is associated with the import (export) of pollutants to (from) GBZ. Furthermore, high relative humidity significantly contributes to the maintenance of stable atmospheric boundary layers and the accumulation of particulate pollutants. When relative humidity (RH) is less than  $80\%$ , the particle number concentration with diameters ranging from  $150\text{ nm}$  to  $1.0\text{ }\mu\text{m}$  increases greatly with the increase of RH, which could result in a poor visibility. The number concentration of particles within different size ranges changes variously with RH, causing different impacts on visibility. The higher the RH, the larger the contribution of humidity to the visibility reduction.

**Key words:** particles size distribution, particulate pollutants, meteorological factors

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41375155)资助

2017年1月12日收稿; 2018年5月23日收修定稿

第一作者:李星敏,主要从事应用气象与大气环境. Email:lixingmin803@163.com

## 引 言

近年来,频繁出现的雾-霾天气引起了人们的广泛关注,雾-霾严重时高速公路封闭,航班难以起降,呼吸道疾病增加等,给人们的生产生活带来了很大影响。雾-霾发生的主要原因是严重的颗粒物污染,气象条件对雾-霾的形成、分布、维持与消散起着显著作用,当气象条件不利于污染物扩散时,污染物积聚到一定程度就会引起雾-霾(张小曳等,2013;马学款等,2017)。近年来,有关气象条件对雾-霾形成的影响已有不少研究,张人禾等(2014)分析了2013年1月中国东部持续性强雾-霾天气产生的气象条件,认为热力作用和动力作用对这次雾-霾天气过程均具有重要贡献,并且贡献程度大致相当。曹伟华等(2013)对北京2009年11月3—8日的持续性雾-霾过程的分析表明,边界层逆温、相对湿度(relative humidity, RH)和 $PM_{2.5}$ 质量浓度是雾-霾形成的主要因子。张小玲等(2014)对2013年1月27—31日中国华北平原雾-霾天气的数值分析表明,高空以平直纬向环流为主,地面风速小、RH较大,不利于污染物扩散和稀释;边界层内稳定、高湿的气象条件对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的形成、积聚和维持较有利。花丛等(2015)对比分析了2013年1—2月华北雾-霾天气边界层特征,认为边界层结构对雾-霾的形成、维持和消散起关键作用。张恒德等(2011)从环流背景、垂直运动、RH及低层逆温等方面对华东地区一次大范围雾过程进行了诊断分析。陈龙等(2016)分析了近10年来影响武汉地区的主要地面环流型及其特点,并探讨了不同环流型与污染物浓度之间的关系。潘玮等(2017)的分析表明,近50年中国霾日数的变化与近地面风和大气RH关系密切。

陕西关中北部是陕北黄土高原、南部为陕南秦巴山地,气溶胶光学厚度值常年高于周边地区(Li et al, 2010)。以西安为中心的关中城市群是陕西省经济的核心区域,也是国家重点区域大气污染防治规划中的重点城市群。本文基于观测数据分析了混合层高度、RH、风速风向等气象因素的变化对颗粒物浓度和谱的影响,从气象条件对颗粒物粒径谱影响的角度,进一步揭示气象条件与颗粒物污染对雾-霾的产生、发展和维持机制,为雾-霾综合治理提供参考。

## 1 资料与方法

本文选取2013年12月1日至2014年12月30日观测资料;逐小时气温、10 min 风速风向与日最高气温,逐日08时L波段探空秒数据取自西安泾河国家基本气象观测站。 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 质量浓度使用西安市环境保护局公布的逐时全市平均浓度(西安市13个观测点的平均值)。气溶胶粒子谱观测资料取自位于西安市长安区的秦岭大气科学试验基地的空气动力学粒径谱仪(Aerodynamic Particle Sizer Spectrometers Model 3321, APS, 分52个粒径段,测量 $0.5\sim 20\ \mu m$ 的颗粒物粒径谱)和扫描电迁移率粒径谱仪(Scanning Mobility Particle Sizer Model 3034, SMPS, 分成54个粒径段,测量 $10\sim 487\ nm$ 的颗粒物粒径谱),APS和SMPS安装在集装箱式观测仓房内,环境采样系统安装在集装箱顶上,采样头距离地面约4 m。APS和SMPS均为美国TSI公司生产,设置每5 min 采样1次,APS采样过程中,气体试样经过了直径为8 cm、长度为45 cm的装有硅胶的干燥管初步干燥;SMPS气体试样经过了环境采样系统(Model 3031200)自带干燥管的干燥。观测数据使用时通过采样状态和气体流量等参数检查(数据记录中采样状态、气体流量参数显示错误或非正常时,则该数据剔除不用);通过数据随时间的变化对数据的连续性、一致性进行检验,剔除野值,以及对存疑数据进行核实等方法对数据进行质量控制。因为仪器故障和检修等原因,APS获得的数据为2014年2—4和8—12月,SMPS获得的数据为2014年1—5月和7月24日至12月31日。与粒径谱分析相关的RH和能见度资料,取自秦岭大气科学试验基地观测场内的长安国家气象观测站地面自动气象观测资料。文中计算最大混合层高度采用王式功等(2000)求解二元一次方程组的方法。

## 2 结果分析

### 2.1 关中特殊的地形及严重的颗粒物污染是霾易发的主要原因

关中平原位于陕西省中部,海拔大部分在500 m 以下,北部是海拔1000~1500 m 的陕北黄土

高原,南部为陕南秦岭山地,海拔为 1500~2500 m。关中平原是向东开口的喇叭形盆地,且东部主要盛行东北风或东风,气流进入关中平原后,受地形阻挡污染物不易扩散,使得该地区气溶胶光学厚度值常年高于周边地区(Dong et al, 2013; He et al, 2016),成为全国雾-霾多发地区之一。

图 1 为 2014 年 2 月 25 日霾天气( $\text{PM}_{10}$ :  $403 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ :  $230 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )和 4 月 11 日非霾天气( $\text{PM}_{10}$ :  $68 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ :  $43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )APS 监测的颗粒物粒子谱的日变化,霾天时  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度达到了  $230 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , APS 监测的  $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$  粒子的数浓度达到了  $1500 \text{ cm}^{-3}$ , 整日粒子的数浓度都较大,且日变化不明显;而 4 月 11 日非霾天,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度为  $43 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 空气质量良好, 07—08 时随着人类活动的增加颗粒物浓度逐渐增大, APS 监测的颗粒物数浓度达到  $500 \sim 555 \text{ cm}^{-3}$ , 17—18 时粒子的数浓度降到  $113 \sim 150 \text{ cm}^{-3}$ , 傍晚后开始升高,但绝大部分时间段内粒子的数浓度在

$300 \text{ cm}^{-3}$  以内,非霾天的颗粒物数浓度远小于霾天。另外从 APS 和 SMPS 监测的取暖期和取暖后(取暖期: APS 数据 2014 年 2 月 19 日至 3 月 15 日, SMPS 数据 2014 年 2 月 1 日至 3 月 15 日;取暖后期: APS 数据 2014 年 3 月 16 日至 4 月 27 日, SMPS 数据 2014 年 3 月 16 日至 4 月 30 日)平均粒子谱的对比来看(图 2),取暖期间除 SMPS 监测小于  $50 \text{ nm}$  的粒子外,其余 APS 和 SMPS 监测的各粒径段粒子的数浓度均高于取暖后期,也进一步说明了人类活动对颗粒物浓度增加的影响,同时也是冬季易出现雾-霾的原因之一。

## 2.2 混合层高度变化对颗粒物污染扩散的影响

最大混合层高度反映了大气的垂直扩散能力,混合层高度高,大气对颗粒物污染的垂直扩散能力强,有利于降低地面污染物的浓度(饶晓琴等, 2008; 郭蕊等, 2016; 于庚康等, 2015)。在 2013 年 12 月 17—25 日西安严重雾-霾过程中日最大混合层高度

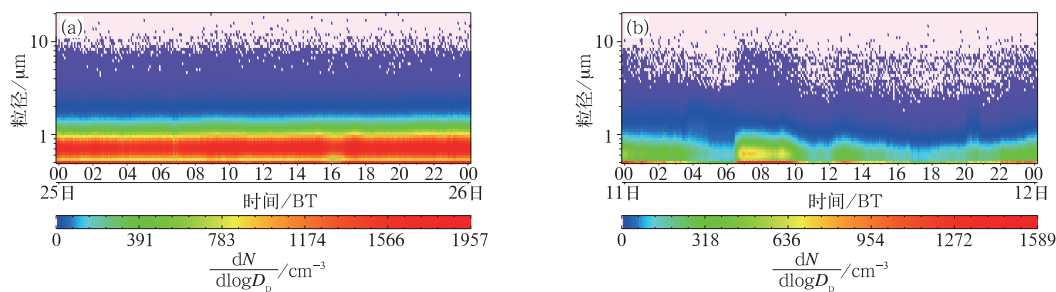


图 1 2014 年 2 月 25 日(a)和 4 月 11 日(b)APS 监测的颗粒物粒子谱

Fig. 1 Particle size distribution measured by APS on 25 February 2014 (a) and 11 April 2014 (b)

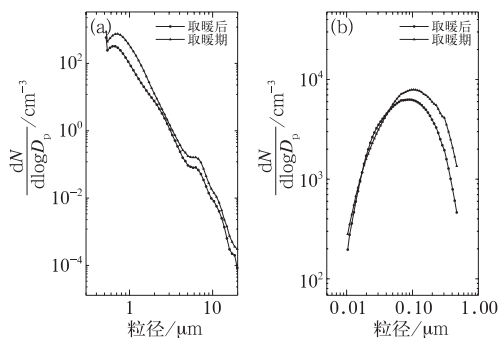


图 2 2014 年 2—4 月 APS(a)和 SMPS(b)监测的取暖前后颗粒物粒子谱的比较

Fig. 2 Comparison of particle size distributions measured by APS (a) and SMPS (b) before and after the period of heating

基本在 650 m 以下,最严重的 24 和 25 日最大混合层高度分别只有 188 和 306 m,而日平均的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度达到了  $500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上。图 3 是 2013 年 12 月至 2014 年 12 月西安市日平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与西安日最大混合层高度散点图,考虑到降水对气溶胶粒子的清除作用,剔除了有降水发生日的  $\text{PM}_{2.5}$  与混合层高度数据。从图中可以看出,日最大混合层高度与日平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度具有较好的负相关关系,拟合方程的  $R^2$  达到 0.348,进一步分析不同空气质量时,最大混合层高度的平均值(表 1),清洁天空气质量为优、良时,最大混合层高度的平均值分别为 1986.7 和 1553.1 m,随着污染加重,最大混合层高度降低,严重污染( $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度  $> 250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )时,混合层高度降到 500 m 以下。混合层高度

高,湍流交换旺盛,有利于地面  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度降低。但混合层高度与地面颗粒物浓度的日变化并不同步,据杜川利等(2014)研究,关中混合层高度的最大值出现在 15—16 时,而地面颗粒物浓度的最低值出现在 17 时,混合层高度改变在前,地面  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度响应在后。

从不同季节的混合层高度与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的关系来看,冬季拟合方程的  $R^2$  为 0.39,相关性最好;其次为秋季, $R^2$  为 0.217。这主要是因为秋、冬季地面风速小于春、夏季,与垂直扩散的关系更为密切。秋、冬季混合层高度的变化对于污染物的扩散、雾-霾的变化具有较好指示作用。

表 1 不同空气质量时最大混合层高度的平均值  
Table 1 Average of daily maximum mixing height at different pollution levels

| 空气质量指数类别 | AQI       | $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ | 最大混合层高度平均值/m |
|----------|-----------|---|--------------|
| 优        | $\leq 50$ | $\leq 35$   | 1986.7       |
| 良        | 51~100    | 35~75   | 1553.1       |
| 轻度污染     | 101~150   | 75~115  | 1084.2       |
| 中度污染     | 151~200   | 115~150   | 874.3        |
| 重度污染     | 201~300   | 150~250   | 736.0        |
| 严重污染     | $> 300$   | $> 250$   | 479.0        |

注:表中空气质量指数类别、AQI 及对应的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度引自《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633—2012;中华人民共和国环境保护部,2012)。

Note: The air pollution levels, AQI and corresponding  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentrations from Technical Regulation on Ambient Air Quality Index (on trial) (HJ633—2012; 中华人民共和国环境保护部,2012).

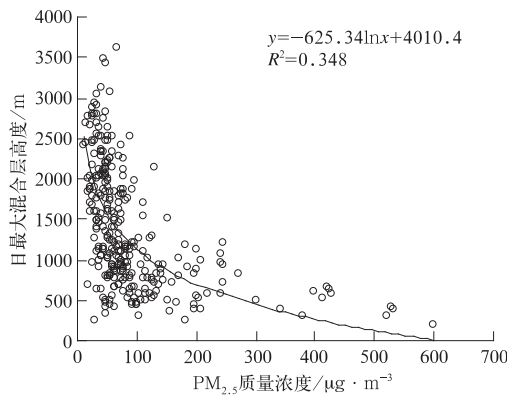


图 3 2013 年 12 月至 2014 年 12 月  
西安市日平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度  
与日最大混合层高度的散点图

Fig. 3 The scatter plot of daily mean  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration and daily maximum mixing height in Xi'an City from December 2013 to December 2014

### 2.3 风对关中 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的影响

风对颗粒物污染的影响主要是扩散和输送。当地面风速小时,空气流动缓慢,污染物不易扩散,有利于颗粒物的堆积和霾的形成,杜传耀等(2015)研究认为风速在  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下时,不利于颗粒物的迅速扩散;而外来污染的输送对本地污染的增长也起到重要作用(王继康等,2017)。关中东部近 30 年主导风向主要为东北风,即向关中盆地的喇叭口逆向吹风,使得气流进入关中平原后,受到地形的阻挡,污染物不容易扩散。2014 年逐时观测的西安泾河风向频率,在 16 个风向中东北风和东北偏北风占了总风向频数的 39%。各个风向对应的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度依次为静风  $75.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、西北偏北风(NNW)  $68.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和西北风(NW)  $68.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;最小为东南偏南风(SSE)  $52.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,其次为东南风(SE)  $54.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;平均风速最小的 NNW 风( $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和 NW 风( $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )对应的污染物浓度也较大。分析各个风向上平均风速与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度发现,各风向上风速变化与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的变化不同,对比东北风(NE)、东北偏东风(ENE)与西风(W)、西北偏西风(WNW)风速变化对  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的影响(图 4),当风速  $< 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,这四个风向的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度相当,但随着风速的增大,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的变化不同,在 W 和 WNW 方向风的作用下,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度减少迅速,当风速  $\geq 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度减少了  $9.6 \sim 37.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,反映出 W 和 WNW 方向风对污染物的稀释扩散作用,而在 NE 方向,当风速从  $< 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  到  $1.0 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度仅下降了  $6.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而当风速从  $1.0 \sim 2.0$  增大到  $2.0 \sim 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,NE 和 ENE 方向上  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度不降反增,反映了此方向上风的输送作用。不同方向风速变化对污染物浓度的影响体现了西北气流对污染物的扩散和东北气流对污染物的输送作用。由于关中以北和以西人口密度较小,工业欠发达,西北风带来的干冷空气,有利于污染物的扩散;而来自南方的气流需要翻越秦岭到达关中,秦岭对污染物具有一定的阻挡作用,因此由南方输入到关中近地面的污染物较少,对近地面污染物质量浓度的影响不大;不同于前面三种风向,来源于偏东方向的气流则经由东部污染较重地带,且气流推进过程中没有山脉的阻挡,污染物可以轻易由偏东风带入关中地区。

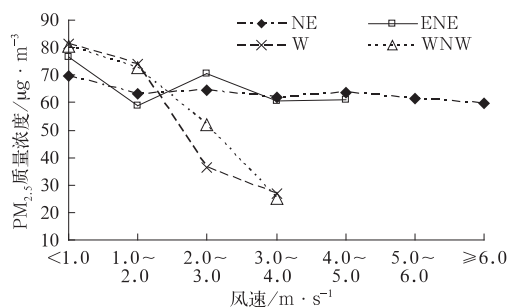


图4 在不同风向不同等级风速下  
PM<sub>2.5</sub>质量浓度的变化

Fig. 4 Changes of PM<sub>2.5</sub> mass concentration  
in response to different wind speeds  
and wind directions

## 2.4 相对湿度(RH)对颗粒物粒径谱及能见度的影响

研究表明,干气溶胶粒子吸湿后,其粒径将增大,随着粒径的吸湿长大(孙景群,1985),颗粒物的散射能力增强,从而影响大气的能见度和辐射强迫等;在相同颗粒物污染情况下,RH越大,对能见度的降低越明显(李星敏等,2014;贺千山和毛节泰,2005),对雾-霾的形成越有利。

图5为APS(资料时段2014年2—4和8—12月)和SMPS(资料时段2014年1—5月、7月24日至12月31日)观测的不同湿度条件下,气溶胶粒子数浓度粒径谱分布。表2给出了不同RH时,能见度与APS和SMPS观测的数浓度。从图5和表2可以看出,RH不同时APS和SMPS观测的气溶胶数浓度谱的变化也是不同的。

对于SMPS监测的数浓度粒径谱来说,当 $RH \leq 30\%$ 、 $30\% < RH \leq 40\%$ 及 $40\% < RH \leq 60\%$ 时,粒子谱的峰值均位于67.3 nm,随着RH的增加,以67.3 nm为峰值的粒子的数目是增加的,且峰值附近的粒子数浓度增加最明显;当 $80\% < RH \leq 90\%$ 及 $RH > 90\%$ 时,粒子谱的峰值移至89.8 nm附近,且随着RH的增加峰值对应的数浓度降低。不同粒径段粒子浓度随RH的变化是不同的,粒径 $< 25$  nm的粒子的数目随着RH的增加是减少的, $30\% < RH \leq 40\%$ 与 $RH < 30\%$ 时相比,粒径 $< 25$  nm的粒子总数减少了10.1%,而 $40\% < RH \leq 60\%$ 与 $30\% < RH \leq 40\%$ 相比减少了9.1%;在 $60\% < RH \leq 80\%$ 时,粒径 $< 150$  nm的粒子数目比 $40\% < RH \leq 60\%$ 时减少了15.9%,而粒径

$> 150$  nm的粒子的数浓度增加了6%。反映出随着RH的增大,气溶胶粒子在凝结、碰并及吸湿增长作用下,小粒子减少,而较大粒子增多。随着RH的变化,SMPS监测的总数浓度也由 $RH \leq 30\%$ 的 $8137.8 \text{ cm}^{-3}$ ,增加到 $40\% < RH \leq 60\%$ 的 $10198.7 \text{ cm}^{-3}$ ,而后下降到 $RH > 90\%$ 的 $7138.9 \text{ cm}^{-3}$ 。SMPS的另一特点是,RH变化,粒子数浓度随RH的变化过程中,粒径在37.9~148.6 nm的粒子,数浓度随着RH的增加而增大,当 $RH > 60\%$ 时,数浓度随RH的增加而减少;粒径在150~437.1 nm的粒子的数浓度,在 $RH > 80\%$ 时开始减少;但粒径 $> 437.1$  nm的粒子数浓度在 $RH > 90\%$ 时减少,反映出湿清除的影响。因此随着RH的变化,由于碰并、吸湿增长和湿清除等作用,不同粒径段的粒子,数浓度的变化是不同的。

对于APS监测的数浓度粒径谱来说,粒径 $< 1.0 \mu\text{m}$ 的粒子,当 $RH \leq 60\%$ 时,随着RH的增大,数浓度在增加,各粒径段粒子数浓度的增加都在50%以上;随着RH的进一步增大,粒径 $< 1.0 \mu\text{m}$ 的粒子总数浓度的增加变缓, $60\% < RH \leq 80\%$ 时的数浓度比 $40\% < RH \leq 60\%$ 时增加了38%,而 $80\% < RH \leq 90\%$ 时的数浓度仅比 $60\% < RH \leq 80\%$ 增加了15.8%,到 $> 90\%$ 时反而减少了20%。对于粒径在 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的粒子,RH在 $40\% \sim 80\%$ 时,随RH的增加数浓度增多最明显,当 $RH > 90\%$ 时,数浓度反而减少。随着RH的变化,APS监测的总数浓度, $RH \leq 30\%$ 时最少,为 $83.1 \text{ cm}^{-3}$ ;  $80\% < RH \leq 90\%$ 时最多,为 $384.0 \text{ cm}^{-3}$ ,而 $RH > 90\%$ 时下降为 $305.1 \text{ cm}^{-3}$ 。

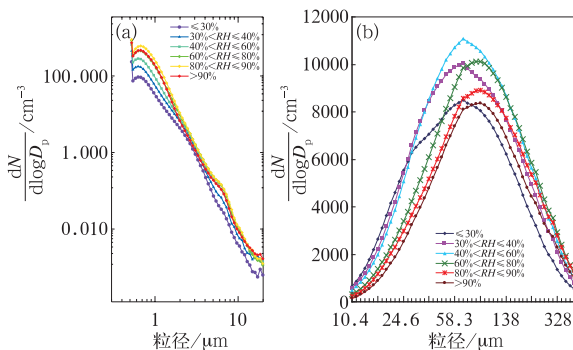


图5 不同RH下APS(a)和  
SMPS(b)气溶胶粒子谱

Fig. 5 Aerosol particle size distributions  
measured by APS (a) and SMPS (b)  
in different relative humidities



粒子数浓度在不同 RH 的变化一方面反映出气溶胶粒子在水汽的作用下的凝结、碰并及吸湿增长作用(姚青等,2014;Liu et al,2013),使得对能见度影响较大的可见光波段的粒子数目增多;另一方面反映出 RH 大时,水汽多,使得大气热效率降低,有利于稳定层结的维持,也更有利于气溶胶粒子的堆积,使颗粒物数浓度随湿度的增加而增大;但当  $RH>90\%$  时颗粒物数浓度反而减小,反映出湿清除的作用。

从上面 RH 对 SMPS 和 APS 监测的粒子数浓度谱的影响分析中发现,在  $RH\leq 80\%$  时,粒径在  $150\text{ nm}\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$  的粒子的数浓度,随着 RH 的增大明显增加,这对降低能见度和形成雾-霾有重要作用。不同的 RH 条件下,气溶胶数浓度对能见度的影响不同(姚青等,2014)。对 SMPS 观测的  $10\sim 487\text{ nm}$  和 APS 观测的  $0.5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$  的各粒径谱段的数浓度与能见度进行相关分析,发现不同粒径段粒子的数浓度与能见度的相关是不同的,SMPS 观测的粒径  $>284\text{ nm}$  的 7 个粒径段粒子的数浓度与

能见度的负相关都在 0.5 以上(通过 0.001 的显著性水平检验),而 APS 观测的粒径在  $0.5\sim 1.037\text{ }\mu\text{m}$  的 10 个粒径段粒子的数浓度与能见度的负相关在 0.5 以上(通过 0.001 的显著性水平检验),且随着粒子直径的增大,相关是减小的,可见不同粒径的粒子对能见度的影响是不同的。

分析 RH 与能见度的关系发现(表 2),当  $RH\leq 30\%$  时,观测样本能见度的平均值分别为  $17.9\text{ km}$  (APS)和  $15.1\text{ km}$  (SMPS);当  $40\%<RH\leq 60\%$  时,能见度的平均值分别为  $8.9\text{ km}$  (APS)和  $10.1\text{ km}$  (SMPS), $\leq 3\text{ km}$  的低能见度分别占到  $7.1\%$  (APS)和  $16.2\%$  (SMPS);而当  $RH>90\%$  时,能见度的平均值仅为  $2.8\text{ km}$ , $\leq 3\text{ km}$  的低能见度分别占到  $73.4\%$  (APS)和  $73.1\%$  (SMPS),说明能见度的降低与 RH 密切相关。

分析在给定 RH 下,颗粒物与能见度的关系(表 3)发现,在同一 RH 下,随着颗粒物的增多,能见度迅速下降,具有较好的指数关系,且 RH 在  $50\%\sim 90\%$  时, $R^2$  在 0.785 以上,颗粒物对能见度的影响

表 2 不同 RH 下,能见度与 APS 和 SMPS 观测的数浓度  
Table 2 Visibility and particle number concentration measured by APS and SMPS in different relative humidities

| RH         | 谱峰值<br>粒径<br>/nm | SMPS                 |         |         |                         |                  |                      | APS                  |                |                         |                  |                      |
|------------|------------------|----------------------|---------|---------|-------------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------|-------------------------|------------------|----------------------|
|            |                  | 数浓度/cm <sup>-3</sup> |         |         |                         | 平均能<br>见度<br>/km | 能见度<br>≤3 km<br>占比/% | 数浓度/cm <sup>-3</sup> |                |                         | 平均能<br>见度<br>/km | 能见度<br>≤3 km<br>占比/% |
|            |                  | <25 nm               | <150 nm | >150 nm | 总数浓度<br>(10~<br>487 nm) |                  |                      | <1.0 μm              | 1.0~<br>2.5 μm | 总数浓度<br>(0.5~<br>20 μm) |                  |                      |
| ≤30%       | 67.3             | 1148.2               | 6908.3  | 1229.6  | 8137.8                  | 15.1             | 3.0                  | 78.6                 | 4.3            | 83.1                    | 17.9             | 0.0                  |
| 30%<RH≤40% | 67.3             | 1031.7               | 7802.3  | 1699.3  | 9501.5                  | 11.3             | 10.6                 | 149.8                | 7.1            | 157.2                   | 11.0             | 0.4                  |
| 40%<RH≤60% | 67.3             | 937.8                | 8222.3  | 1976.4  | 10198.7                 | 10.1             | 16.2                 | 224.4                | 10.4           | 235.2                   | 8.9              | 7.1                  |
| 60%<RH≤80% | 83.5             | 638.4                | 6914.2  | 2097.9  | 9012.1                  | 7.2              | 30.7                 | 309.0                | 18.6           | 328.0                   | 5.8              | 28.5                 |
| 80%<RH≤90% | 89.8             | 546.5                | 6016.9  | 1938.6  | 7955.6                  | 5.2              | 54.6                 | 357.9                | 25.7           | 384.0                   | 4.0              | 61.7                 |
| >90%       | 89.8             | 434.9                | 5515.7  | 1623.3  | 7138.9                  | 2.8              | 73.1                 | 286.5                | 18.3           | 305.1                   | 2.8              | 73.4                 |

表 3 不同 RH 下,APS 观测的小于  $2.5\text{ }\mu\text{m}$  的粒子数浓度与能见度拟合方程  
Table 3 Fitted equation of visibility and particle number concentration measured by APS in different relative humidities

| RH  | 颗粒物浓度(x)与能见度(y)<br>拟合方程,相关系数平方( $R^2$ ) | 能见度平均值<br>/km | 数浓度平均值<br>/ $\text{cm}^{-3}$ | 样本数<br>/个 |
|-----|---|---------------|------------------------------|-----------|
| 98% | $y=193.19x^{-0.6736}, R^2=0.5009$       | 2.0           | 182.7                        | 82        |
| 90% | $y=610.79x^{-0.8188}, R^2=0.8589$       | 3.8           | 365.7                        | 68        |
| 80% | $y=854.92x^{-0.8357}, R^2=0.8408$       | 5.2           | 402.7                        | 47        |
| 70% | $y=1116.6x^{-0.9666}, R^2=0.7877$       | 6.0           | 344.8                        | 44        |
| 60% | $y=1370x^{-1.0995}, R^2=0.7849$         | 6.8           | 265.0                        | 44        |
| 50% | $y=2376.2x^{-1.2576}, R^2=0.8857$       | 9.0           | 292.9                        | 31        |
| 40% | $y=1038.4x^{-0.8958}, R^2=0.4629$       | 10.7          | 161.4                        | 26        |
| 30% | $y=2098.3x^{-1.3009}, R^2=0.5006$       | 13.6          | 118.4                        | 25        |

最明显,可见能见度的变化与颗粒物关系密切。

取能见度为 3 km,分析 APS 观测的粒径  $<2.5 \mu\text{m}$  粒子的数浓度与 RH 的关系,发现两者具有很好的线性关系,即

$$y = -9.3204x + 1072.6, \quad R^2 = 0.647$$

式中,  $x$  为相对湿度,  $y$  粒子数浓度。按照  $y = 9.3204x$  的比例关系计算出与 RH 相当的粒子数目,与该 RH 下观测的粒子数浓度相加看作 RH 与颗粒物对大气消光的总效应,与 RH 相当的粒子数目与总效应之比可近似看作 RH 对能见度的贡献。由此计算出在能见度分别为 3 和 5 km 情况下, RH 在不同粒子浓度情况下对能见度,也就是对大气消光的贡献约分别为 37.3%~92.2% 和 24.3%~84.3%,分别平均为 67.9% 和 50.0%,湿度越大,对降低能见度的贡献也越大。

### 3 结 论

(1) 关中特殊的地形影响及颗粒物污染是霾易发的主要原因。

(2) 混合层高度与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度具有较好的负相关关系,混合层高度高时,地面  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度也较低,反映出混合层湍流对颗粒物污染扩散的影响。冬季混合层高度高与  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的负相关性较好,其次为秋季,主要是因为秋、冬季地面风速小于春、夏季,与垂直扩散的关系更为密切。

(3) 关中东部近 30 年主导风向主要为东北风,即向关中盆地的沿喇叭口逆向吹风,使得气流进入关中平原后,受到地形的阻挡,污染物不容易扩散。关中各风向上风速变化对颗粒物浓度的影响表明,西北气流对关中污染物主要起扩散作用,东北气流则对污染物具有输送作用。

(4) 湿度大,有利于稳定层结的维持,有利于颗粒物的集聚。不同粒径段的粒子,随着 RH 的变化,数浓度的变化不同,当  $\text{RH} \leq 80\%$  时,粒径在  $150 \text{ nm} \sim 1.0 \mu\text{m}$  的粒子的数浓度,随着 RH 的增大明显增加,对降低能见度和形成雾-霾具有重要作用。 $\text{RH} > 90\%$  时,颗粒物数浓度的减少,反映出湿清除的影响。在给定的大气能见度情况下,相对湿度在不同粒子浓度情况下对能见度,也就是对大气消光的贡献不同,湿度越大,对降低能见度的贡献也越大。

### 参考文献

曹伟华,梁旭东,李青春,2013. 北京一次持续性雾-霾过程的阶段性特征及影响因子分析[J]. 气象学报,71(5):940-951.

- 陈龙,智协飞,覃军,等,2016. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象,42(7):819-826.
- 杜川利,唐晓,李星敏,等,2014. 城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J]. 高原气象,33(5):1383-1392.
- 杜传耀,于丽萍,王珣,等,2015. 对雾-霾过程的综合探测[J]. 气象,41(12):1525-1530.
- 郭蕊,段浩,马翠平,等,2016. 河北中南部连续 12 d 重霾污染天气过程特征及影响因素分析[J]. 气象,42(5):589-597.
- 贺千山,毛节泰,2005. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究[J]. 气象学报,63(3):374-384.
- 花丛,张碧辉,张恒德,2015. 2013 年 1—2 月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J]. 气象,41(9):1144-1151.
- 李星敏,董自鹏,陈闯,等,2014. 陕西关中气溶胶对大气能见度的影响研究[J]. 高原气象,33(5):1289-1296.
- 马学款,张碧辉,桂海林,等,2017. APEC 前后北京几次静稳天气边界层特征对比分析[J]. 气象,43(11):1364-1373.
- 潘玮,左志燕,肖栋,等,2017. 近 50 年中国霾年代际特征及气象成因[J]. 应用气象学报,28(3):257-269.
- 饶晓琴,李峰,周宁芳,等,2008. 我国中东部一次大范围霾天气的分析[J]. 气象,34(6):89-96.
- 孙景群,1985. 能见度与相对湿度的关系[J]. 气象学报,43(2):230-234.
- 王继康,花丛,桂海林,等,2017. 2016 年 1 月我国中东部一次大气污染物传输过程分析[J]. 气象,43(7):804-812.
- 王式功,姜大膀,杨德保,等,2000. 兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J]. 高原气象,19(3):363-370.
- 姚青,蔡子颖,韩素芹,等,2014. 天津冬季相对湿度对气溶胶浓度谱分布和大气能见度的影响[J]. 中国环境科学,34(3):596-603.
- 于庚康,王博妮,陈鹏,等,2015. 2013 年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析[J]. 气象,41(5):622-629.
- 张恒德,饶晓琴,乔林,2011. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析[J]. 高原气象,30(5):1255-1265.
- 张人禾,李强,张若楠,2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾-霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学:地球科学,44(1):27-36.
- 张小玲,唐宜西,熊亚军,等,2014. 华北平原一次严重区域雾-霾天气分析与数值预报试验[J]. 中国科学院大学学报,31(3):337-344.
- 张小曳,孙俊英,王亚强,等,2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报,58(13):1178-1187.
- 中华人民共和国环境保护部,2012. 环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行):HJ633—2012[S]. 北京:环境保护部.
- Dong Zipeng, Yu Xing, Li Xingmin, et al, 2013. Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data[J]. Chin Sci Bull, 58(35):4486-4496.
- He Qingqing, Zhang Ming, Huang Bo, 2016. Spatio-temporal variation and impact factors analysis of satellite-based aerosol optical depth over China from 2002 to 2015[J]. Atmos Environ, 129:79-90.
- Li Bengang, Yuan Huishi, Feng Nan, et al, 2010. Spatial and temporal variations of aerosol optical depth in China during the period from 2003 to 2006[J]. Int J Remote Sens, 31(7):1801-1817. DOI:10.1080/01431160902926665.
- Liu X G, Li J, Qu Y, et al, 2013. Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China[J]. Atmos Chem Phys, 13(9):4501-4514.