

毕凯,王广河,毛节泰. 2009 年上海浦东新区能见度资料的深度分析[J]. 气象,2012,38(2):220-227.

2009 年上海浦东新区能见度资料的深度分析 ——兼论高时间分辨率地面观测资料的应用^{*1}

毕 凯^{1,3} 王广河¹ 毛节泰²

1 中国气象科学研究院人工影响天气中心,北京 100081

2 北京大学物理学院大气科学系,北京 100871

3 北京市人工影响天气办公室,北京 100089

提 要: 利用 2009 年上海浦东新区气象站高时间分辨率的能见度资料及其同步地面气象要素资料,在气块静力稳定的假设下研究了由于辐射冷却引起的霾或雾在演变的各阶段气溶胶吸湿性增长及其消光系数随相对湿度的变化,结果表明:气溶胶吸湿性增长率 $f(RH)$ 随相对湿度的增长具有先慢后快平滑连续的特点;气溶胶吸湿性增长率在不同季节有所差异,在夏季和秋季较高,在冬季和春季时较低;平均而言,当相对湿度从 40% 增大到 95% 时,气溶胶吸湿性增长率可达 6.6;对比国内外实验和观测结果,发现 $f(RH)$ 随相对湿度的变化曲线与硫酸铵亲水增长相似;在这种雾消散时,随着气温的升高,测量给出的相对湿度值不会立即下降,而是在接近饱和的情况下维持一段时间,然后再迅速下降,其滞后大约为 1~2 小时。这很可能是测湿元件不能及时反映外界湿度变化所致。

关键词: 能见度,水汽密度,气溶胶,吸湿性增长率

In-Depth Analysis on Atmospheric Visibility in Shanghai Pudong 2009 ——Concurrently on Applying Surface Meteorological Data with High Temporal Resolution

BI Kai^{1,3} WANG Guanghe¹ MAO Jietai²

1 Weather Modification Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Science, Physics College, Peking University, Beijing 100871

3 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

Abstract: The absorption of water by ambient aerosols and the influence of ambient relative humidity on the extinction coefficient are investigated under the assumptions that the atmosphere is in static stability during low visibility process caused by radiative cooling using the continuous observations data (visibility, relative humidity, temperature, wind etc.) from Shanghai Pudong automatic weather stations in 2009. The subtle features of meteorological elements are also studied with such high temporal resolution (1 min) data. The results show that the hygroscopic growth factor $f(RH)$ of the extinction coefficient increased continuously with RH and featured a first-slow-then-quick uptrend. The curves obtained from different seasons show that $f(RH)$ was relatively higher in summer and autumn than that in winter and spring. Overall, the average $f(RH)$ in 7 cases could reach to 6.6 when RH increased from less than 40% to 95%. We also present comparisons with other researches in the world, and the result shows that the behavior of the average of hygroscopic growth factor of the extinction coefficient in the cases is similar to the calculated

* 国家科技支撑计划项目(2006BAC12B04)、中国气象局行业专项(GYHY201106031,GYHY201006011)、国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403401)共同资助

2010 年 11 月 7 日收稿; 2011 年 9 月 5 日收修定稿

第一作者: 毕凯,从事能见度与人工影响天气方面的研究. Email:becare2008@163.com

growth factor of the scattering coefficient for ammonium sulfate. Further study also shows that the decrease of relative humidity is lagging about 1–2 hours behind the increase of temperature and visibility, which is conjectured that the humidity sensor fails to change quickly enough to measure the variation of relative humidity of the local air mass.

Key words: visibility, vapor density, aerosol, hygroscopic growth factor

引 言

能见度是衡量大气透明状况的一个重要指标,它不仅反映出该地区的大气环境质量,而且与人类社会活动密切相关,尤其对航空、航海、铁路、公路等运输部门及空军、海军的活动影响更为明显^[1]。恶劣能见度给人们工作、生活带来了诸多不便甚至危害,常常是诱发重大交通事故和飞机起降重大事故的重要因素^[2]。因此,探讨和研究能见度,特别是低能见度时气象要素的特点,对于进一步提高低能见度雾霾预报、保证交通安全以及城市减灾有重要意义。

20 世纪 60 年代,国际上就已经开展能见度的相关研究,主要用能见度来分析大气环境质量状况。进入 80 年代,学者们细化了对能见度的研究,分别从多种大气污染物及气象条件等不同角度详细分析^[3–5]。与此同时,国内学者也开始研究能见度,由于监测水平的限制,研究主要是从总体特征上探索各地能见度的变化特点。近年来国内外关于城市能见度的演变规律和影响因子方面的研究,主要是从空气质量和气象条件这两大方面来做分析^[6–14]。

通常所说的能见度是气象能见度,指视力正常的人在当时天气条件下能够从天空背景中看到和辨认出目标物(黑色、大小适度)的最大水平距离;夜间则指的是能看到一定强度的灯光的最大水平距离^[15]。在确定了目标背景亮度比及视感域后,能见度研究的问题主要是大气消光系数。在可见光波段,空气分子对大气消光的影响可以忽略。因此,大气消光系数主要取决于大气中气溶胶的消光系数^[16]。研究表明,气溶胶的光学特性是由气溶胶的化学组分、粒径大小、形状及混合态决定的,而这些性质都可能与相对湿度有关^[17]。随着相对湿度的增加,气溶胶中的亲水性质的化学成分(硫酸盐、硝酸盐等)会吸湿增大,从而增加粒子的散射能力^[16],降低大气能见度。因此探索和研究相对湿度对气溶胶消光系数的影响,对于能见度的估算、提高低能见

度雾霾天气预报水平有重要作用。

国内外研究相对湿度对气溶胶光学特性的影响主要采用理论计算和实验的方法。Hanel^[18]曾对气溶胶物理特性随相对湿度的变化进行了理论研究和实际测量,得到粒子尺度、谱分布、平均密度、折射指数与相对湿度之间的函数关系。孙景群^[19]从激光大气探测的角度,计算了单波长下湿气溶胶粒子的消光特性。杨军等^[20]利用 Mie 散射原理和重庆实测气溶胶资料,计算了相对湿度对气溶胶粒子短波辐射特性的影响。张立盛等^[21]采用已有的气溶胶折射指数等资料,研究了相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响。实验法研究气溶胶亲水特性,主要用浊度仪获得散射系数,并对湿度进行调节,从而研究气溶胶散射系数的亲水增长。Malm 等^[22]2001 年通过研究得出在 90% 的相对湿度下,硫酸铵气溶胶的散射截面与干气溶胶相比,可增加 5 倍以上。颜鹏等^[23]利用自制的“进样气流湿度调节”装置,研究了北京地区冬季气溶胶散射系数的亲水增长。

随着大气监测水平的提高,特别是气象台站观测自动化的普及,使得所获得的气象要素资料的时间分辨率越来越高(时间间隔 1 min)。利用这些高分辨率的资料,不仅可以看到雾霾等形成过程中气象要素的细微变化,并且可以进一步发现以前未注意到的现象。如何合理、针对性地使用这些高分辨率气象资料,对于气象台站工作人员进一步认识天气状况、提高知识应用水平,以及提高雾霾能见度预报能力有重要意义。

本文利用上海浦东新区气象站 2009 年高时间分辨率(1 min)的能见度资料和同步地面常规气象要素资料,一方面讨论了低能见度天气雾霾转换阶段的气象特征和气象要素细微的变化。另一方面研究了从霾到雾演变过程中环境相对湿度的变化对气溶胶消光系数的影响。以期对低能见度天气气溶胶光学特性的研究、低能见度天气的预报及城市大气污染控制提供参考,同时也为台站气象工作人员应用高时间分辨率资料提供参考。

1 资料来源

本文所用地面气象记录(包括相对湿度、气温、气压、风速风向、降水量、水汽压)资料来自于 2009 年上海浦东新区气象局(31.14°N, 121.32°E)自动站的观测记录,时间间隔为 1 min。

同期的能见度资料来自于该站 VAISALA MILOS 500 的 FD-12P 型前向散射式能见度仪。该仪器根据气溶胶粒子前向散射特性,用 LED 灯发射一束辐射峰值波长为 875 nm 的近红外光,然后测量 33° 的前向散射光,来计算出气象能见度。仪器时间分辨率为 1 min,量程为 10~50000 m,其中 10~10000 m 范围内误差为 10%。董国青等^[24]通过 1998 年 3 月至 1999 年 10 月底进行的自动站观测与人工目测结果对比分析表明,VAISALA MILOS 500 自动站的能见度记录比目测能见度更客观、更精确。

文中所用的 2009 年浦东新区日 PM₁₀ 和 NO₂ 的 API 指数资料来自于上海市环境监测中心提供的上海市空气质量分区日报,由浦东新区各个监测站数据进行 24 小时平均计算得到。

2 研究方法 with 说明

2.1 低能见度日雾霾过程天气状况的分类

上海浦东新区低能见度过程一般出现在后半夜到日出前后。为了方便讨论,本文把前一日中午 12 时到当日中午 12 时作为一天,来给出气象要素日变化图。若其中出现小时平均能见度低于 1 km 的时次,则称为一个低能见度日。在排除了降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气后,造成能见度下降的天气主要是雾和霾。根据吴兑等^[25]关于霾和雾区分的概念模型,以及新的地面气象观测规范^[26],本文在讨论中使用了下列概念:即能见度 0~10 km、相对湿度小于 80% 时为霾,相对湿度大于 95% 时为雾,介于之间为湿霾。

2.2 水汽密度计算方法

根据地面气象记录提供的每分钟气温和水汽压数据,可以进一步计算水汽密度。假设理想气体的状态方程对湿空气中的水汽仍可使用,利用干空气

的比气体常数 R_d ,由状态方程可得到水汽密度^[27]:

$$\rho_v = \frac{e\varepsilon}{R_d T} \quad (1)$$

式中, ρ_v 是水汽密度,单位为 $g \cdot m^{-3}$; e 是水汽压,单位是 hPa; $\varepsilon=0.622$, $R_d=287.05 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, T 为绝对温度的气温。

2.3 气溶胶吸湿性增长研究方法及其说明

根据 Koschmieder 能见度理论,大气的能见度方程^[28]为

$$vis = -\frac{\ln 0.02}{k_{ex}} = \frac{3.912}{k_{ex}} \quad (2)$$

式中, k_{ex} 为大气消光系数(单位: m^{-1} 或 km^{-1})。

大气消光系数 k_{ex} 由 4 部分组成^[29]:

$$k_{ex} = k_{scat} + k_{abs} = k_{sg} + k_{sp} + k_{ag} + k_{ap} \quad (3)$$

其中, k_{sg} 为空气分子散射系数, k_{sp} 为颗粒物散射系数, k_{ag} 为气体吸收系数, k_{ap} 为颗粒物吸收系数。

空气分子的散射属于瑞利散射^[30]。近地面层,标准状况下空气分子在可见光波段的瑞利散射系数约为 $0.0141 km^{-1}$ (相当于能见度 277 km)^[27]。在可见光波段,气体对可见光的吸收主要有 NO₂ 的吸收。当 NO₂ 浓度为 $0.1 mg \cdot m^{-3}$ (相当于 $API(NO_2) = 75$) 时,在 550 nm 处的吸收系数约为 $0.0172 km^{-1}$ ^[31]。经统计,上海浦东新区 2009 年 NO₂ 日 API 最大值为 78,因此该地区气体吸收对能见度造成的影响足以忽略。颗粒物的散射主要是由于粗细气溶胶粒子(硫酸盐、硝酸盐、有机盐等)的散射,是消光系数的主要贡献者。颗粒物对可见光的吸收指气溶胶粒子中元素碳的吸收,与碳的含量有关,其吸收系数在消光系数中所占的比例大约 3%~15%^[16]。因此,在讨论可见光波段的大气消光时,可以近似看成是气溶胶粒子的消光(主要是散射消光)。

在研究气溶胶吸湿性增长时,常用吸湿性增长的增长函数表示。Malm 等在研究中把散射系数吸湿性增长率定义为干、湿气溶胶散射系数比随相对湿度的变化^[22-23],本文把消光系数亲水增长函数定义为:

$$f(RH) = k_{ex}(RH) / k_{ex}(\text{dry}) \quad (4)$$

式中, $k_{ex}(RH)$ 和 $k_{ex}(\text{dry})$ 分别表示气溶胶在“干”大气和相对湿度为 RH 的环境大气的消光系数。在本文讨论中,把相对湿度 $RH < 40\%$ 作为“干”大气^[32]。

3 典型低能见度日过程分析

根据浦东新区气象局台站 A 文件记录(天气现象电码(10,02)10,02,05),2009 年 12 月 22 日夜间到 23 日白天出现雾霾天气。

图 1 为 2009 年 12 月 23 日(儒略日 356)低能见度过程前后气象资料和能见度的时间序列图。从图 1 中可以清楚地看到,从前一日午后(图中的 G 点,15:32)开始到第二天上午(图中 E 点,09:18),风速基本为 0,这是由于辐射冷却造成局地雾霾等低能见度天气的主要条件。在这静风($0 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 1 级风($0.3 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)^[15]时段中,局地空气可以认为和周围没有交换。

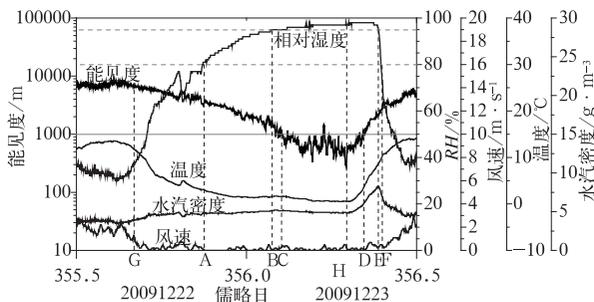


图 1 2009 年 12 月 22—23 日低能见度日雾霾天气过程气象要素综合图

Fig. 1 Meteorological elements in a low-visibility day during 12:00 BT 22 to 12:00 BT 23 December 2009

对于水汽而言,因为主要是夜间,地面蒸发不大,气块中的水汽密度基本上没有变化(从图 1 水汽密度的曲线中也可以看出这一点)。对大气气溶胶而言,它应该是有日变化的,但许建明等^[33]研究发现,浦东新区站点干气溶胶散射系数小时平均值在 0.2 km^{-1} 到 0.3 km^{-1} 之间,日变化波动较小,且在夜间基本维持稳定。因此在下面的讨论中,本文假定气溶胶本身也没有变化,消光系数的变化完全是由于气溶胶吸湿性增长造成的。在这样的假设下,可以把局地这个气块看作是一个孤立气块,仅仅由于温度的变化,使相对湿度发生变化,气溶胶发生吸湿性增长,导致能见度的下降。此时,可以利用相对湿度和能见度的变化,得出有关气溶胶吸湿性增长的特性,其结果画在图 2 中。很多工作研究过气溶胶的消光系数随相对湿度变化的情况,它在气溶胶辐射特性研究,尤其在能见度估算中具有重要的

作用。如果利用静风和 1 级风条件下的实测数据也可以取得这类数据,对这方面的应用是有重要应用价值的。

从图 1 中可以看到,气温从 G 点开始持续下降,相对湿度相应增大,使得能见度也逐步下降。到 C 点(02:30)时,能见度已下降到 1 km 以下,应当是属于大雾的条件,由于没有其他辅助观测,并不能判断这是雾还是霾。但按照吴兑等^[25]关于雾和霾概念模型的说明,当相对湿度达到 95% 以后即为雾,也可以认为这时是大雾。从 H 点(07:02)开始,气温开始回升,这显然是太阳辐射的作用,此时能见度也开始改善,但相对湿度并没有立刻下降。当温度开始上升时,雾滴开始蒸发,补充的水汽使得空气湿度仍然维持在饱和附近,并使能见度得到改善,但观测数据显示直到 E 点(09:18),相对湿度才开始下降,从 H 到 E 这一段相对湿度维持的阶段一般可持续 1~2 小时,相应的水汽密度增加有近 $2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,这显然不是雾水蒸发所能提供的。这种相对湿度变化的延迟和相应水汽密度的增长现象估计是湿度探头不能及时反映周围空气相对湿度的变化所致^[34]。由于是属于探测技术问题,比较复杂,在本文中仅仅提出这一现象,而不做更进一步的探讨。从 E 点以后,地面风速就不再是静风了,相对湿度急速下降,这时气温和能见度并没有急剧变化。雾的消散常常和起风是相联系的,这里存在一个很困难的问题,是雾消散、辐射加热条件变化引起风的变化? 还是风的变化引起雾的消散? 如果是后者,那么风的变化又是由什么控制的? E 点可以认为是雾消散的时刻,对雾的预报是很重要的,搞清控制 E 时刻到来的因子对于雾的预报将有参考意义。

因此,从本个例中可以看出两件事:

(1) 对于这种由于辐射冷却引起的雾或霾过程,利用气块静稳的假设,从高时间分辨率气象资料可以研究气溶胶的吸湿性增长特性。

(2) 当地面风速开始增大,相对湿度会急剧下降,辐射雾过程也随之结束。

选取 G~H 时段(22 日 15:32 至 23 日 7:01)作为气溶胶吸湿性增长特性的研究时段。在此时间段内,平均风速 $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,75% 的时间风速在 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,属于气象上的静风($0 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 1 级风($0.3 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

图 2 为在这段过程中消光系数吸湿性增长率曲线。实线为 Harris 函数拟合曲线,校正系数为

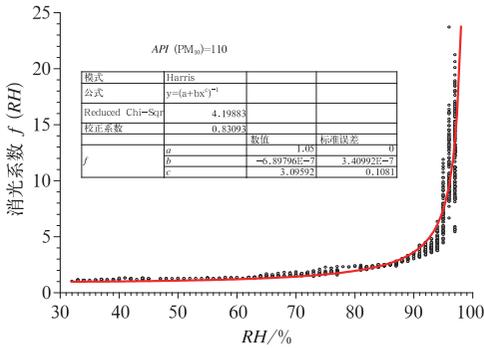


图 2 2009 年 12 月 22 日 15:32 至 23 日 07:01 消光系数随相对湿度的变化曲线

Fig. 2 Extinction coefficient growth factor versus relative humidity from 15:32 BT 22 to 07:01 BT 23 December 2009

0.83093, 表明 Harris 函数能够较好地反映出消光系数吸湿性增长率的变化。从图 2 中可以看出, $f(RH)$ 随相对湿度增大而平滑连续增大, 在 $RH < 50\%$ 时, $f(RH)$ 基本在 1 左右, $RH > 60\%$ 时, $f(RH)$ 开始增加, $f(RH = 80\%)$ 为 1.952; $RH > 90\%$ 时, $f(RH)$ 增加很快, $RH > 95\%$ 时, $f(RH)$ 可以超过 20。

4 低能见度天气特点普遍性

图 1 中看到的一些现象, 究竟是否具有普遍性, 这是十分值得关注的。为此在图 3 中, 本文同时给出 2009 年上海浦东新区气象站资料中其他 6 次过

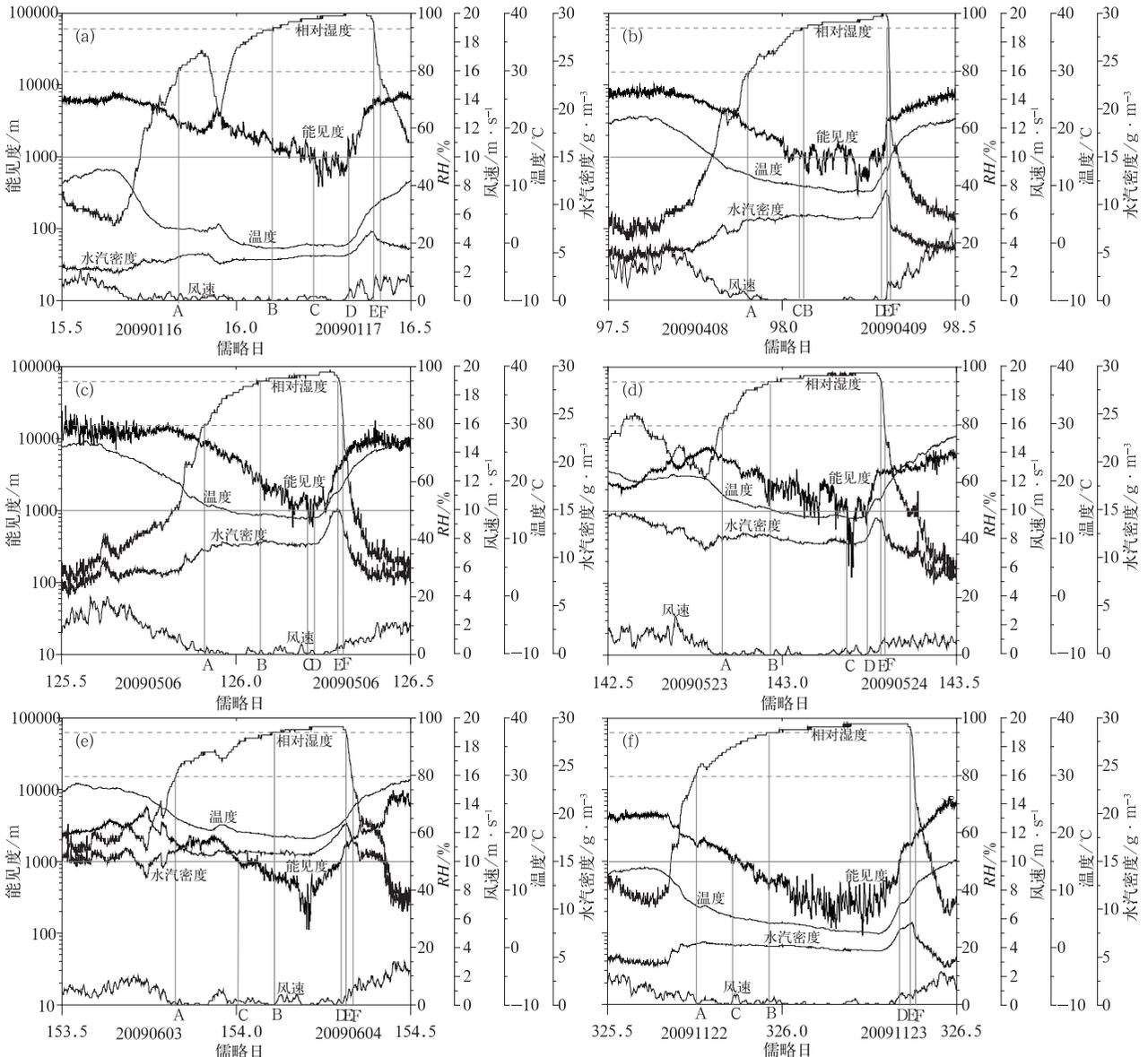


图 3 不同低能见度日气象要素图
Fig. 3 Meteorological elements in different low-visibility days

程的缩略图,其目的是要说明,这些现象在多次过程中是重复出现的。

4.1 不同低能见度过程气溶胶亲水增长曲线

这节从上海浦东新区 2009 年各个季节选取了 6 个低能见度雾霾过程,对从霾到雾转变过程中气

溶胶的消光特性进行研究。表 1 是不同研究时段气象要素和气溶胶状况,可以看出,所选时段风速是静风和 1 级风。根据本文在前面讨论中所做的假定,静稳大气中气溶胶与外界没有交换,因此消光系数随相对湿度的变化,在一定程度上反映了气溶胶吸湿性增长特性。

表 1 2009 年不同研究时段中气象要素和气溶胶状况

Table 1 States of the meteorological variables and atmospheric aerosols in different low-visibility days in 2009

儒略日	API(PM ₁₀)	吸湿性增长时段	始风速/m·s ⁻¹	末风速/m·s ⁻¹	平均风速/m·s ⁻¹	最低 RH/%	最高 RH/%
16	92	1 月 16 日 16:00 至 17 日 7:00	0.5	0	0.16	28	99
98	98	4 月 8 日 18:06 至 9 日 1:50	1.5	0	0.44	39	96
126	69	5 月 6 日 20:06 至 7 日 4:49	1.3	0.1	0.24	50	97
143	86	5 月 23 日 18:39 至 24 日 4:29	0.8	0.3	0.14	61	98
154	82	6 月 3 日 18:00 至 4 日 4:41	0.9	0	0.33	60	96
326	117	11 月 22 日 15:17 至 23 日 3:00	0.7	0	0.26	34	97
356	110	12 月 22 日 15:32 至 23 日 7:01	1.4	0.3	0.22	32	98

注:API 为 50~100,空气质量为良;API 为 100~150,空气质量为轻微污染

图 4 是用 Harris 函数分别拟合的上述低能见度日中气溶胶吸湿性增长率的变化曲线。对于那些最小相对湿度高于 40% 的日资料,本文把气溶胶消光系数先用 Harris 函数进行拟合,延伸得到相对湿度 40% 时的消光系数,然后计算气溶胶吸湿性增长率。

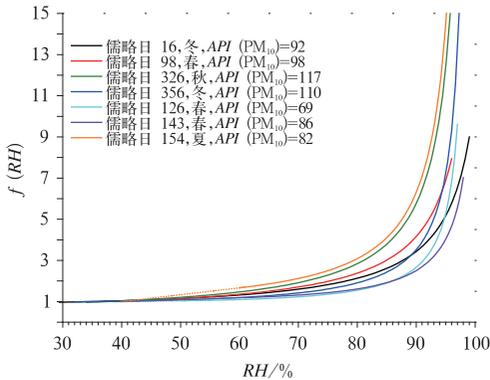


图 4 不同日期气溶胶吸湿性增长率曲线

Fig. 4 Variations of extinction coefficient growth factor with relative humidity in different periods

气溶胶中的化学成分决定了气溶胶吸湿性增长率特性,由于不同气溶胶来源其尺度分布和化学成分都不同,所以消光系数随相对湿度的变化特点也不同。通过图 4 中可以看出,在夏季和秋季低能见度日,气溶胶吸湿性增长率比冬季和春季明显增大,说明夏季和秋季气溶胶的亲水性成分含量相对较高。不同污染条件下,消光系数亲水增长也不同,这反映的是当时天气形势下气溶胶本身的特性(粒子大小、谱分布、数浓度等),要弄清这种消光系数随相

对湿度变化不同的原因,还需要结合气溶胶的化学成分分析和谱分布特点进行进一步的研究。从图 4 中总体来看,关于相对湿度对气溶胶吸湿性增长的影响,在相对湿度较小时,增长较慢;在相对湿度较大时,增长较快;在相对湿度超过 90% 的时候,增长更为迅速。

图 5 为 Harris 拟合的表 1 中 7 次过程气溶胶吸湿性增长率,与美国能见度监测网计算的硫酸铵

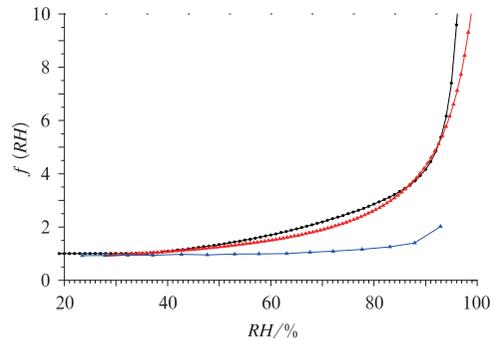


图 5 不同地区气溶胶光学特性亲水增长 (黑色线图为美国能见度监测网,根据硫酸铵气溶胶计算的散射系数亲水增长^[36],蓝色为北京 CAMS 测点散射系数亲水增长,红色线表示上海浦东地区消光系数亲水增长)

Fig. 5 Variations of growth factor with RH at different sites

(The black line indicates the calculated growth factor for ammonium sulfate given by IMPROVE, USA. The blue line indicates the scattering coefficient growth factor at CAMS site in Beijing. The red line indicates the extinction coefficient growth factor at Pudong site in Shanghai)

增长率因子随相对湿度的变化曲线,以及与颜鹏等^[23]所测的北京地区气溶胶吸湿性增长率的对比图。需要说明的是本文数据所得出的曲线为气溶胶消光系数吸湿性增长率,美国能见度监测网和北京地区的数据为散射系数增长率随相对湿度的变化图。根据潘鹤等^[35]的观测,上海霾天气中吸收系数仅为散射系数的 10%~20%,因此可同用来比较。图 7 中显示上海浦东地区气溶胶吸湿性增长率曲线与硫酸铵散射系数增长因子的曲线非常近似,可以认为上海浦东地区的气溶胶主要以硫酸铵盐为主。

4.2 水汽密度、相对湿度和风速的变化特点

图 3 中 2009 年上海浦东地区的这六个低能见度过程的气象要素和能见度的时间变化有很多相似性,在雾消时均存在比较明显的相对湿度滞后和水汽密度的凸变点。根据统计,2009 年上海浦东地区出现低能见度日 39 天,其中同一天包含雾消散过程的有 23 天,占 58.97%。雾消散时相对湿度下降时间出现时间滞后的有 22 天,占 95.65%。同期伴随出现水汽密度凸变的有 21 天,占 91.30%。同时在图 6 中给出了环北京地区的河北涿州气象站 2010 年 12 月 22 日低能见度过程的气象要素和能见度的时间序列图。图中也可以明显地看到,雾消时水汽密度存在凸变拐点,这说明这一特点存在普遍性。

通过上海浦东新区以及涿州地区低能见度过程的观测结果,可以看出在雾消散的时候,同时也观测到风速的普遍增大,浦东 23 个包含雾消散过程的低能见度日中,雾消后风速增大到 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的

有 23 次,占 100%;风速增大到 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的有 19 次,占 82.6%。有可能是风的增大造成了水平输送使得雾消散,也有可能是雾消散时太阳辐射增强,气温升高,使得空气湍流增强,从而使得雾消散。由于缺少相关数据的测量,因此这一现象的原因有待于进一步的探索。

5 结 论

(1) 本文利用气块静力稳定的假设,使用高时间分辨率气象资料研究了上海浦东地区低能见度雾霾转化过程中气溶胶吸湿性增长率特性。发现气溶胶吸湿性增长率 $f(RH)$ 在相对湿度从低到高的变化过程中,表现出先慢后快连续平滑增长的特点。平均而言,当相对湿度增大到 95% 时, $f(RH)$ 可达 6.6。

(2) 不同季节、不同污染状况下气溶胶吸湿性增长率也有不同,在夏季和秋季时较高,在冬季和春季时较低。平均而言与硫酸铵吸湿性增长类似。

(3) 在雾消散过程中,当温度开始增加以后,雾滴开始蒸发,但 95.65% 的情况下相对湿度还会维持一段时间饱和,这段时间约 1~2 小时,相应的水汽密度也有增大,这很可能显示了测湿元件的缺陷。

(4) 雾的消散常常和地面风的加大相关联,雾滴蒸发完后,82.6% 的情况下风速可增大到 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。相对湿度急剧下降,辐射雾过程随之结束。

(5) 借助台站高时间分辨率数据的使用,使得本文能够进一步地了解低能见度日雾霾天气过程中气象要素细微的变化,显示了高时间分辨率的地面气象资料中包含有丰富的信息,值得进一步开发利用。

致谢:感谢上海浦东新区气象站和河北涿州气象站提供的地面气象观测资料。

参考文献

- [1] Bäumer D, Vogel B, Versick S, et al. Relationship of visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany[J]. Atmos. Environ, 2008, 42(5): 989-998.
- [2] 吴彬贵,解以扬,吴丹朱,等.京津塘高速公路秋冬雾气象要素与环流特征[J].气象,2010,36(6): 21-28.
- [3] Stuart P N, William D S. A study of visibility in eighteen cities in the western and southwestern United States[J].

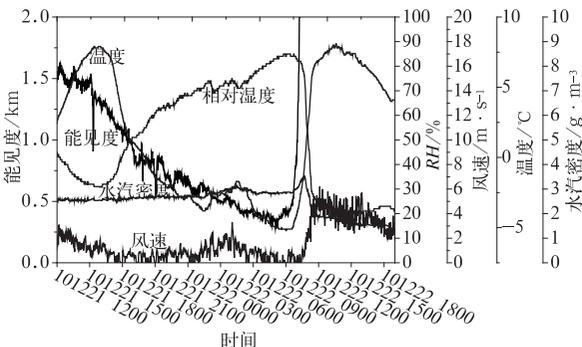


图 6 2010 年 12 月 21 日 12:00 至 22 日 19:00 涿州低能见度过程雾霾天气气象要素综合图

Fig. 6 Meteorological elements in low-visibility process in Zhuozhou, Hebei Province during 12:00 BT 21 to 19:00 BT 22 December 2010

- Monthly Weather Review, 1981, 109(10): 2394-2400.
- [4] Lee D O. The choice of visibility statistics in the analysis of long term visibility trends in southern England[J]. Weather, 1988, 43: 332-338.
- [5] Lee D O. The influence of wind direction, circulation type and air pollution emissions on summer visibility trends in southern England[J]. Atmos Environ, 1990, 24A: 195-201.
- [6] Doyle M, Dorling S. Visibility trends in the U K 1950-1997 [J]. Atmos Environ, 2002, 36: 3161-3172.
- [7] 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 623-628.
- [8] 孟燕军, 王淑英, 赵习方. 北京地区大雾日大气污染状况及气象条件分析[J]. 气象, 2000, 26(3): 40-42.
- [9] 李雄. 1980年地面气象观测规范变更对能见度资料连续性影响研究[J]. 气象, 2010, 36(3): 117-122.
- [10] 王婷, 潘蔚娟, 湛志刚, 等. 珠江口持续性雾生消的环流特征和成因分析[J]. 气象, 2010, 36(6): 13-20.
- [11] 赵瑞金, 李江波. 一次华北平原大雾天气 CINRAD/SA 雷达超折射回波的射线追踪分析[J]. 气象, 2010, 36(2): 62-69.
- [12] 王玮, 黄玉芳, 孔凡忠. 中国东部一场持续性大雾的诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(9): 84-90.
- [13] 向波, 刘德, 廖代强. 重庆雾的特点及其变化分析[J]. 气象, 2003, 29(2): 48-52.
- [14] 周学鸣, 蔡诗树. 厦门城市能见度和雾的特征与城市环境演变[J]. 气象, 2004, 30(1): 41-45.
- [15] 《大气科学词典》编委会. 大气科学词典[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 583, 852.
- [16] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the U. S[J]. J Geophys Res, 1994, 99(D1): 1347-1370.
- [17] Piliis C S, Pandis S N, Seinfeld J H. Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosol size and composition[J]. J. Geophys Res, 1995, 100: 18739-18754.
- [18] Hanel G. The physical chemistry of atmospheric particles. Hygroscopic Aerosols, Eds. Ruhnke L H and Deepak A, A. Deepak Publishing, 1984: 1-20.
- [19] 孙景群. 湿气溶胶的光散射特性[J]. 高原气象, 1983, 2(3), 49-54.
- [20] 杨军, 李子华, 黄世鸿. 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响[J]. 大气科学, 1999, 23(2): 239-247.
- [21] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. 气象学报, 2002, 60(2): 230-237.
- [22] Malm W C, Day D E. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity[J]. Atmos Environ, 2001, 35: 2845-2860.
- [23] 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究[J]. 气象学报, 2008, 66(1): 111-119.
- [24] 董国青, 董榕, 虞兆国, 等. 能见度自动监测站与人工观测站的对比试验和能见度自动监测站合理布点初探[C]. 城市气象服务科学讨论会学术论文集, 2001年.
- [25] 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 15.
- [26] 地面气象观测规范. QX/TA48-2007. 第4部分: 天气现象观测.
- [27] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 22, 448.
- [28] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 298.
- [29] Eidels-Dubovoa S. Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City[J]. Sci Total Environ, 2002, 287: 213-220.
- [30] Vande Hulst H C. Light scattering by small particles[M]. Dover Publications, New York, NY, 1981.
- [31] Horvath H. Atmospheric light absorption-A review[J]. Atmos Environ, 1993, 27A: 293-317.
- [32] Xu J, Bergin M H, Yu X, et al. Measurement of aerosol chemical, physical and radiative properties in the Yangtze delta region of China[J]. Atmos Environ, 2002, 36: 161-173.
- [33] 许建明, 耿福海, 甄灿明, 等. 上海浦东地区气溶胶散射系数及影响因子[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 211-216.
- [34] 苑跃, 赵晓莉, 王小兰, 等. 相对湿度自动与人工观测的差异分析[J]. 气象, 2010, 36(2): 102-108.
- [35] 潘鸽, 耿福海, 陈勇航, 等. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2164-2173.
- [36] IMPROVE. Relative Humidity Adjustment Factors, $f(RH)$ [DB/OL], http://vista.cira.colostate.edu/improve/tools/humidity_correction.htm, 2004-9-16/2011-2-10.