

姚青,蔡子颖,韩素芹,等. 2009 年秋冬季天津低能见度天气下气溶胶污染特征[J]. 气象, 2012, 38(9): 1096-1102.

# 2009 年秋冬季天津低能见度天气下 气溶胶污染特征<sup>\* 1</sup>

姚 青<sup>1,2</sup> 蔡子颖<sup>1</sup> 韩素芹<sup>1</sup> 曲 平<sup>1</sup>

1 天津市气象科学研究所, 天津 300061

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

**提 要:** 为研究天津城区秋、冬季雾霾等低能见度天气下气溶胶污染特征, 采用 2009 年 10—12 月的大气能见度及相关气象和环境监测数据, 并结合一次典型雾霾事件分析  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量浓度演化过程及其垂直分布特征。结果表明, 低能见度天气占秋、冬季观测时长的一半以上, 其中以霾天气为主; 典型低能见度过程分析显示, 霾日近地层内  $PM_{2.5}$  分布均匀, 表现出显著的区域污染特征; 雾日气溶胶质量浓度先升高后下降, 系气溶胶粒子吸湿性增长与导致可溶性组份溶出的湿清除协同作用, 低层  $PM_{2.5}$  质量浓度显著高于较高层, 其垂直分布差异与相对湿度的垂直变化和逆温层高度有关。

**关键词:** 雾, 霾, 气溶胶, 垂直分布, 能见度

## Study on the Pollution Characteristics of Aerosols During Low Visibility Weather at Tianjin City in Autumn and Winter 2009

YAO Qing<sup>1,2</sup> CAI Ziyang<sup>1</sup> HAN Suqin<sup>1</sup> QU Ping<sup>1</sup>

1 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300061

2 Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA, Beijing 100081

**Abstract:** To research the pollution characteristics of aerosols during low visibility weather in Tianjin, the observational data of visibility,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  mass concentrations and meteorological factors in the autumn and winter of 2009 were studied. At the same time a case of low visibility was analyzed to find out the evolvement processes and vertical distributions of atmospheric aerosol mass concentrations. The results have indicated that most of low visibility weather cases are in haze, accounting for half of the samples or more. Analysis of the typical low-visibility process has shown that  $PM_{2.5}$  follows a uniform distribution in haze days with significant regional pollution characteristics. The aerosol mass concentration is increased first and then decreased in foggy days because of both hygroscopic growth of aerosols and wet clearing due to the dissolution of soluble components.  $PM_{2.5}$  mass concentrations in the surface layer are more than those in higher layers, depending on the vertical variation of RH and the inversion layer height.

**Key words:** fog, haze, aerosol, vertical variation, visibility

## 引 言

大气能见度可用以表征大气清洁程度<sup>[1]</sup>, 影响

能见度的因素主要包括降水、雾、大风、沙尘暴和扬沙等天气现象, 以及大气中广泛存在的污染性气体和气溶胶等。雾霾等低能见度天气现象给人们生产生活带来诸多不便和各种危害, 因此低能见度天气

\* 国家环境保护公益性行业科研专项(201009001)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006011)和中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2009011)共同资助

2011 年 6 月 29 日收稿; 2012 年 2 月 21 日收修定稿

第一作者: 姚青, 主要从事大气环境与大气化学科研工作. Email: yao. qing@163. com

现象引发了社会各阶层广泛关注<sup>[2-6]</sup>。随着环渤海区域经济和机动车保有量迅速增长,天津地区大气污染复合型特征显著,突出体现在持续性的区域污染及低能见度天气频繁发生<sup>[7-8]</sup>。统计分析近40年天津城区人工观测获得的大气能见度,每日14时能见度观测值的年平均值由1970年的16 km下降至2008年的13 km,低能见度(小于10 km)天气的发生频率也由1970年的16.4%升高至2008年的29.2%。

目前对京津冀地区低能见度天气的研究,多以统计分析为主,主要集中在高速公路<sup>[9-10]</sup>、机场<sup>[11]</sup>及区域长时间序列的能见度变化趋势上<sup>[12-13]</sup>等,对于低能见度天气下空气污染,也多结合地面气象和地面环境监测资料进行相关性分析<sup>[14-17]</sup>,对于低能见度天气下气溶胶浓度演变过程及垂直分布特征等方面的研究较少<sup>[18]</sup>。

本文采用2009年10—12月的大气能见度及相关气象和环境监测数据,分析天津城区秋、冬季雾霾等低能见度天气下的气溶胶污染特征,并结合一次典型雾霾事件分析PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度演变过程及其垂直分布特征,为开展低能见度事件的预报预测与调控治理提供科学依据。

## 1 资料与方法

本文的大气能见度和空气污染资料来源于中国气象局天津大气边界层观测站(39°04'N、117°12'E;

海拔高度2.2 m;台站编号:54517),该站点位于天津市城区南部,其北距快速路约200 m,东临友谊路一友谊南路,西面和南面主要为住宅区,交通源和生活源排放对其有一定影响。观测期为2009年10月1日至12月31日,为期92 d。大气水平能见度采用美国Belfort公司生产的M6000型前向散射式能见度仪进行测量,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度采用美国安普公司生产的TEOM系列RP1400a型环境颗粒物监测仪,PM<sub>10</sub>质量浓度监测仪位于地面,采样管距地面3 m,四台PM<sub>2.5</sub>质量浓度监测仪分别位于地面、大气边界层观测铁塔40、120和220 m处;逐日空气质量指数(API)采用天津市环境监测中心逐日公布的全市平均值,以前一日12时至当日12时的均值作为当日观测值。仪器参数见表1。

常规气象资料来源于与天津大气边界层观测站位于同一位置的天津市城区国家气象观测站(台站编号:54517),所有数据均通过质量控制和数据订正。应用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)等研发的,提供质点轨迹、扩散及沉降分析使用的综合模式系统HYSPLIT([http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php))分析天津气流后向轨迹,轨迹模式所采用的气象资料是美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的FNL全球分析资料,并经过美国国家海洋和大气管理局大气资源实验室(NOAA-Air Resources Laboratory, ARL)的预处理模块转化成模式所需要的格式。

表1 观测仪器参数

Table 1 The basic parameters and specifications of monitoring instruments

观测项目	仪器型号	检测限	量程	精度	流量
PM <sub>10</sub>	RP 1400a	0.06 μg·m <sup>-3</sup>	1500 μg·m <sup>-3</sup>	1.5 μg·m <sup>-3</sup>	16.7 L·min <sup>-1</sup>
PM <sub>2.5</sub>	RP 1400a	0.06 μg·m <sup>-3</sup>	1000 μg·m <sup>-3</sup>	1.5 μg·m <sup>-3</sup>	16.7 L·min <sup>-1</sup>
能见度	Belfort M6000	6 m	20000 m	10%	—

## 2 结果与讨论

### 2.1 2009年10—12月空气污染状况

中国气象局《地面气象观测规范》定义“雾”为大量微小水滴浮游空中,常呈乳白色,使水平能见度小于1.0 km;“轻雾”为微小水滴或已湿的吸湿性质粒所构成的灰白色的稀薄雾幕,使水平能见度大于等于1.0 km,小于10.0 km;“霾”天气则为大量极细

微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于10 km的空气普遍有混浊现象,使远处光亮物微带黄、红色,使黑暗物微带蓝色<sup>[19]</sup>。日常业务观测实践一般以目测能见度结合相对湿度区分雾、轻雾、霾等低能见度天气现象,相应的相对湿度的标准各地观测实践多有不同<sup>[20-21]</sup>。本文参照相关气象行业标准<sup>[22]</sup>,以相对湿度小时值高于90%,能见度小时值低于1 km作为雾的判定标准,相对湿度低于80%,能见度低于10 km作为霾的判定标准,其他能见度小时值低于10 km的时段一律记作“轻雾”,

此外以能见度小时值高于 10 km 作为高能见度天气。如无特别说明,以下讨论所采用的能见度、相对湿度及气溶胶质量浓度等数据均采用小时值。

图 1 是天津 2009 年 10 月 1 日至 12 月 31 日的雾、轻雾、沙尘等低能见度事件的人工观测记录及逐日空气质量指数(API),其中低能见度事件采用天津市城区国家气象观测站人工观测数据,当一日内同时存在雾和轻雾时记作雾日。观测期合计 92 d,其中沙尘天气 1 d,发生在 12 月 25 日,当日 API(首要污染物  $PM_{10}$ )达到 187,空气质量为轻度污染;雾日 6 d,分为 4 次连续过程,分别发生在 10 月 29 日、11 月 7 日、11 月 30 日至 12 月 2 日和 12 月 10 日;轻雾日 41 d,大约占观测期的 45%,雾和轻雾等低

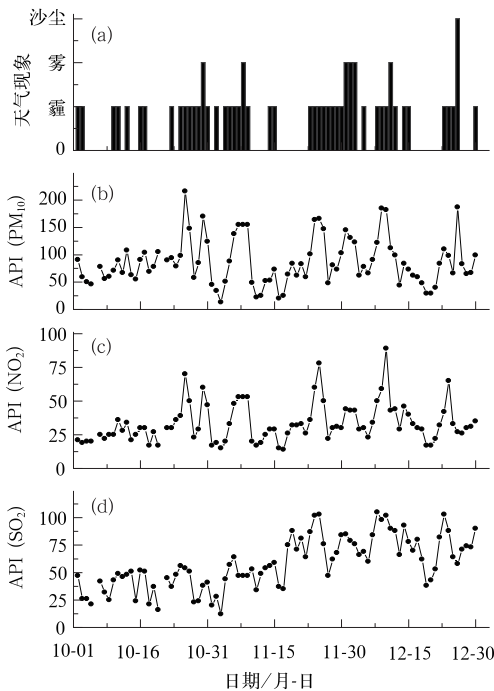


图 1 2009 年 10—12 月天津低能见度天气现象(a)及空气质量指数(b,c,d)

Fig. 1 Daily low visibility weather and API in Tianjin from October to December, 2009

能见度日数达到 2009 年秋、冬季的一半。11 月 30 日至 12 月 2 日的大雾天气是 2009 年入冬以来最强、范围最广的一次,这场广泛分布在我国中东部地区的大雾,持续时间长、强度大、范围广,为历史同期少见<sup>[23]</sup>,根据天气现象记录,11 月 22—29 日连续记作“轻雾”,加上之后连续 3 d 的雾日,天津连续 11 d 出现雾或轻雾天气。与之相应的是,API 超标日达到 25 d,大约占 API 有效观测日数(90 d)的 28%,超标日首要污染物全部为  $PM_{10}$ ,其中轻微污染 15 d,轻度污染 9 d,中度污染 1 d,此外  $SO_2$  超标日 5 d,表明可吸入颗粒物是天津秋、冬季的主要污染物,根据以往的研究成果,颗粒物尤其是细粒子同时也是造成低能见度事件的主要因素<sup>[14,24]</sup>。

表 2 给出了不同低能见度事件下能见度、相对湿度、 $PM_{10}$  质量浓度、 $PM_{2.5}$  质量浓度及累积时间,在有效观测期(2198 h)内,雾、霾、轻雾的累积时间约占全时长的比例依次为 2.4%、37.4%和 10.7%,低能见度事件时长可占到观测期的 50%以上,可见霾是引起低能见度事件的主要天气现象,雾的出现带有阶段性,连续性的大雾天气较少,而轻雾一般作为雾和霾的过渡阶段出现。需要说明的是,12 月 25 日的沙尘天气按上述标准计入霾的范畴内。不同天气下气溶胶质量浓度存在较大的差异,具体体现在雾阶段气溶胶质量浓度最高,霾和轻雾日浓度相当,低能见度天气下  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的质量浓度远高于观测期平均值,并且  $PM_{2.5}$  在  $PM_{10}$  中所占比例较高;高能见度时段往往伴随着大风天气,利于气溶胶粒子的稀释扩散,因而  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量浓度较低,约只有霾和轻雾阶段的一半,并且以粗颗粒物为主( $PM_{2.5}/PM_{10} < 0.5$ )。

## 2.2 典型雾霾日的天气演变过程

自 11 月 22 日起,我国中东部大部分地区持续发生大雾天气,中央气象台连续发布大雾预报,25 日

表 2 2009 年 10—12 月天津城区低能见度天气下的气溶胶统计特征

Table 2 Descriptive statistics of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  under low visibility weather from October to December 2009

	平均能见度 /km	平均相对 湿度/%	$PM_{10}$ 平均值 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$PM_{2.5}$ 平均值 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$PM_{2.5}/PM_{10}$	累积时间 /h	所占时长 比例/%
雾	0.6	93	321	187	0.55	52	2.4
霾	5.3	57	241	126	0.49	821	37.4
轻雾	2.4	86	243	131	0.50	236	10.7
高能见度	17.4	36	118	50	0.37	1089	49.5
观测期间均值	10.8	51	182	91	0.43	2198	—

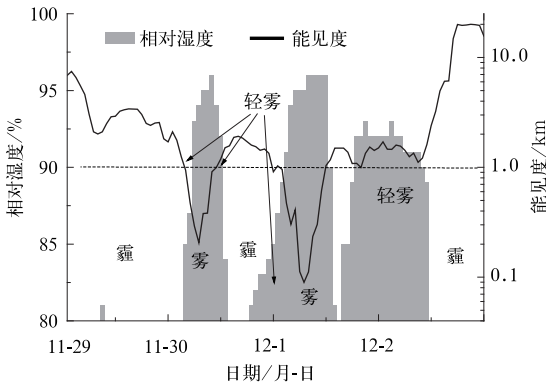


图 2 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日的天津一次典型雾霾演变过程

Fig. 2 The typical low-visibility process from 29 November to 2 December, 2009

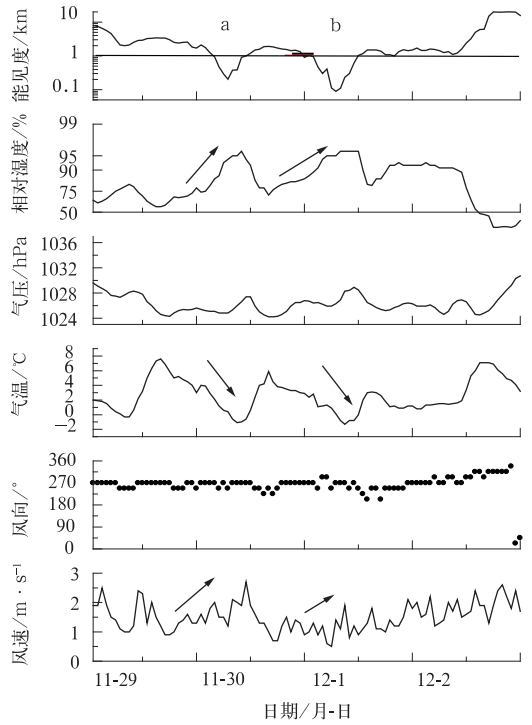


图 3 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日气象要素分布  
Fig. 3 Daily variations of meteorological elements from 29 November to 2 December, 2009

升级为 大雾 橙色 预警,截至 12 月 2 日,中央气象台已经连续 8 d 发布 大雾 橙色 预警<sup>[23]</sup>;从 11 月 22 日至 12 月 2 日,天津 城区 连续 11 d 出现 雾 或 轻雾 天气,本文 采用 该次 低能见度 事件 后期(11 月 29 日至 12 月 2 日)的气象 资料 和 气溶胶 在线 测量 数据(图 2),以 判别 典型 雾霾 天气 条件 下 气溶胶 质量 浓度 变化 及其 垂直 分布 特征,并 采用 后向 轨迹 模式 初步 分析 此次 污染 事件 的 污染物 来源。

11 月 30 日至 12 月 2 日 天津 出现 连续 3 d 的 大雾 天气,过程 期间 大气 能见度、相对湿度、气压、气温、风向 和 风速 的 逐小时 值 如图 3 所示。其中 第一次 雾过程(图中 记作 a 过程)发生在 11 月 30 日 05—10 时,能见度 自 03 时的 0.94 km 逐步 下降,至 06 时 达到 最低 值 0.21 km,相对湿度 则 逐步 升高,05—11 时 维持 在 90% 以上,雾过程 维持 了 6 h,至 11 时 能见度 达到 1.19 km 结束,期间 气温 变化 较小(−1~0.6℃),风速 较小,最大 值 为 2.7 m·s<sup>−1</sup>,风向 以 西风 为主,10 时 以后 风速 增大,随着 相对湿度 减小 至 90% 以下,雾 逐渐 转化 为 轻雾 或 霾。至 次日 02 时 以后 相对湿度 再次 增大 到 90% 以上,形成 第二次 雾过程(图中 记作 b 过程),能见度 最低 值 发生在 12 月 1 日 06 时,仅为 0.09 km,此次 雾过程 强度 高于 前一次 过程,表现在 维持 时间(9 h)和 最低 能见度(0.09 km)上。两次 雾过程 的 发展 阶段 均 伴随 有 相对湿度 的 增加 和 气温 的 下降,气温 的 突然 降低 与 空气中 水汽 凝结 吸热 有关,较低 的 风速 和 连续 稳定 的 偏西 气流 利于 水汽 聚集,两次 过程 中 雾的 消散 与 午后 气温 回升,并 导致 相对湿度 下降 有关,而 消散 期间 能见度 并没有 显著 降低,一般 仍 维持 在 2 km 以下,

雾 转化 为 轻雾 或 霾。11 月 30 日 01 时至 12 月 2 日 10 时 连续 58 h 大气 能见度 低于 2 km,相对湿度 也 基本 维持 在 80% 以上,平均 风速 为 1.4 m·s<sup>−1</sup>(0.5~2.7 m·s<sup>−1</sup>),持续 高湿 静稳 天气 利于 污染物 尤其是 气溶胶 粒子的 聚集,连续 的 雾—轻雾—霾 天气 是 导致 11 月 29 日至 12 月 2 日 连续 4 d 空气质量 指数 API 高于 100 的 重要 原因,而这 4 d 的 首要 污染物 都是 可吸入 颗粒物 PM<sub>10</sub>。

以 中国 气象局 天津 大气 边界层 观测站 为 轨迹 终点,选取 距地面 100、200 和 500 m 处 代表 近地层 不同 高度,11 月 29 日至 12 月 2 日 每日 08 时 气团 到达 本站 的 后向 轨迹 见图 4,选取 08 时 主要是 考虑到 此时 雾处于 成熟 期,且有 较为 完备 的 人工 天气 现象 记录。11 月 29 日 08 时 相对湿度 81%,大气 能见度 为 2.10 km,属 典型 的 霾 天气,随着 高空 风向 的 改变,较冷 的 西北 风 逐渐 取代 原有 偏西 气流,在地面 的 表现 即为 风向 由 WSW 转变 为 W,风速 也有 所 增加(1.0 m·s<sup>−1</sup> 增至 1.9 m·s<sup>−1</sup>)。而后,气温 由 29 日 08 时 的 −0.3℃ 降低 至 1 日 同期 的 −1.3℃,降温 导致 水汽 进一步 凝结,相对湿度 的 升高 是 造成 能见度 降低 和 雾强度 增强 的 重要 原因,12 月 1 日 08 时 相对湿度 增至 96%,大气 能见度 低至 0.23 km,雾

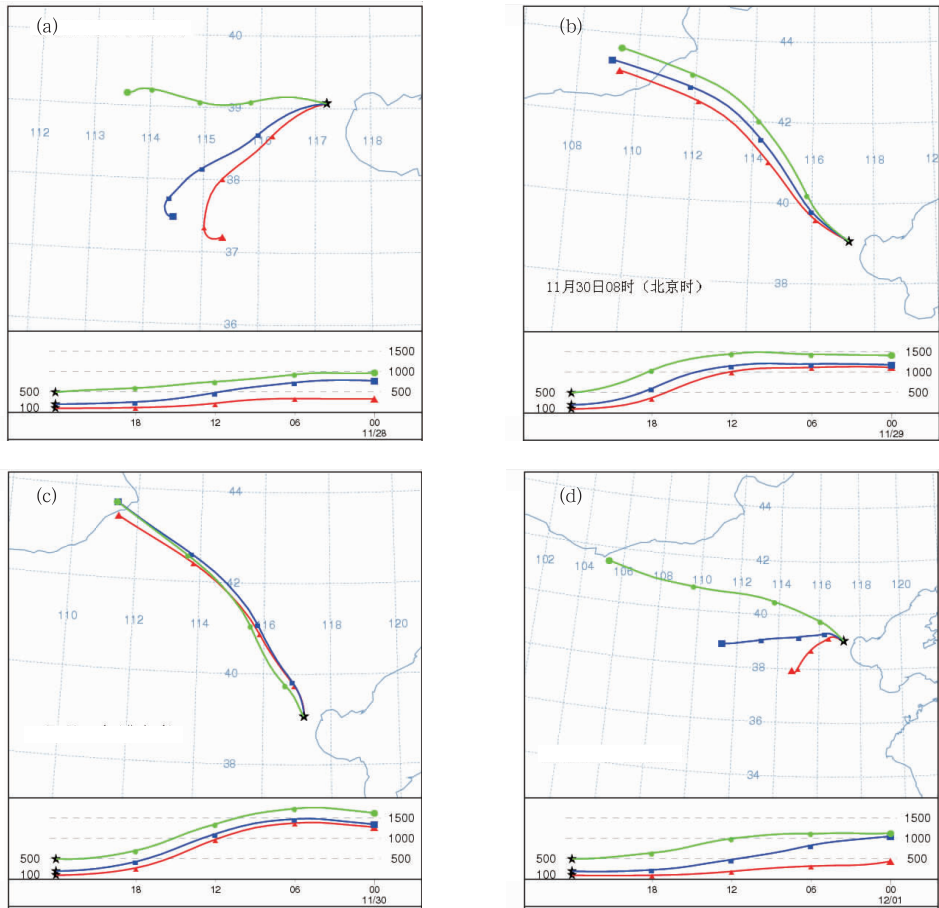


图 4 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日典型霾日和雾日 100、200 和 500 m 气团的后向轨迹  
(a) 11 月 29 日 08 时, (b) 11 月 30 日 08 时, (c) 12 月 1 日 08 时, (d) 12 月 2 日 08 时

Fig. 4 The back trajectories at Tianjin from 29 November to 2 December at  
(a) 08 BT 29 November, (b) 09 BT 30 November, (c) 08 BT 1 December,  
and (d) 08 BT 2 December 2009

加强为大雾级别。

### 2.3 气溶胶变化特征

图 5 为 11 月 29 日至 12 月 2 日地面  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量浓度, 以及  $PM_{2.5}/PM_{10}$  的逐小时值分布。从 11 月 29 日至 12 月 1 日可以看作是雾强度逐渐增大的过程, 3 d 能见度±标准差依次为  $3.41 \pm 1.62$ 、 $1.23 \pm 0.57$  和  $0.90 \pm 0.52$  km, 相对湿度依次为  $69 \pm 7\%$ 、 $84 \pm 7\%$  和  $91 \pm 5\%$ , 相对湿度的增大和能见度的降低是雾强度增大的主要标志。气溶胶质量浓度 3 d 内经历了先升高后下降的过程,  $PM_{10}$  质量浓度依次为  $233.85 \pm 70.72$ 、 $301.87 \pm 41.48$  和  $255.89 \pm 61.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $PM_{2.5}$  质量浓度依次为  $150.53 \pm 48.76$ 、 $222.63 \pm 26.96$  和  $171.44 \pm 47.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  依次为  $0.64 \pm 0.05$ 、 $0.74 \pm$

$0.05$  和  $0.67 \pm 0.07$ , 气溶胶尤其是  $PM_{2.5}$  质量浓度升高主要是由于气溶胶粒子吸湿性增长所致<sup>[25]</sup>, 而伴随着浓雾加强, 空气中的水蒸气不断凝结析出, 大量水溶性无机离子溶解于水滴中而脱离气溶胶粒子, 造成以二次污染物为主的细粒子比含有较多地壳元素的粗粒子更易被水汽湿清除, 因而  $PM_{2.5}/PM_{10}$  伴随雾增强而快速下降。经过连续大雾的清除后, 至 2 日晚间,  $PM_{2.5}$  质量浓度降至最低, 仅为  $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  左右, 而  $PM_{10}$  质量浓度下降幅度较慢, 仍保持在  $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  左右。这是由于风速增大一方面驱散大雾, 快速清除气溶胶粒子, 另一方面大风吹起地面扬尘, 造成大气中的粗粒子增多, 一定条件下维持了的  $PM_{10}$  质量浓度。

关于雾与霾的判定文献多采用地面能见度与相对湿度资料<sup>[26-28]</sup>, 也有依据长波辐射平衡作为判断

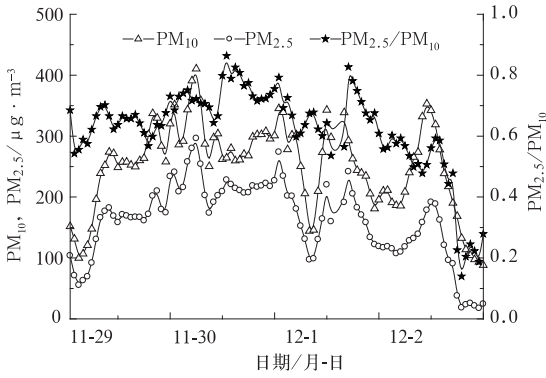


图 5 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度及 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 的逐小时值分布  
 Fig. 5 Daily variations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> mass concentrations PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> from 29 November to 2 December, 2009

水雾和重烟尘雾(霾)的方法<sup>[29]</sup>,或采用晴空指数划分阴霾日和晴天<sup>[30]</sup>,采用边界层气象和污染资料分析并判定雾霾的研究较少。有研究<sup>[18]</sup>表明北京雾日不同高度 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化规律近似,但近地层浓度明显高于较高层,而霾日近地层内 PM<sub>2.5</sub> 垂直分布均匀,表现出明显的城市群区域污染特征。本文分析 11 月 29 日至 12 月 2 日 4 d 近地层内 40、120 和 220 m 处 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的垂直分布特征,可以发现分成明显的 3 个阶段(图 6):11 月 29 日霾天气下 3 层 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度接近一致,且呈显著的增长趋势,3 层 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度平均值依次为 128.43、136.27 和 115.29  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 40 和 120 m 处 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度线性相关系数高达 0.96,120 和 220 m 两者也达到 0.71,较高的相关性表明霾日大气污染的

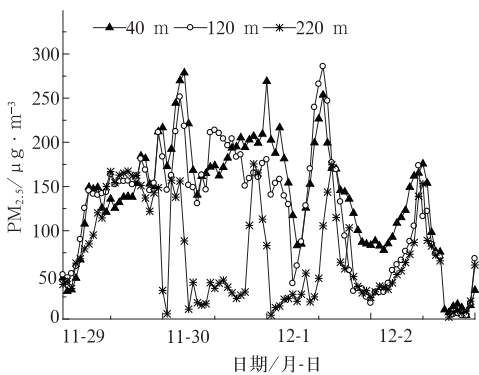


图 6 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的垂直分布  
 Fig. 6 Daily variations in vertical distributions of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations from 29 November to 2 December 2009

区域性特征;11 月 30 日至 12 月 1 日雾日期间,40 和 120 m 处 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度比较接近,两者相关系数为 0.82,220 m 处细粒子浓度显著低于近地面的两层,约为 40 m 处 PM<sub>2.5</sub> 平均值的 34%,约为 120 m 处的 38%;12 月 2 日以后,120 和 220 m 处 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度较为接近,且伴随着雾的消亡快速增长,至午前(10—11 时)与 40 m 处几乎同时达到最高值,然后 3 层浓度快速降低,17 时左右降至仪器检出限附近,能见度也随之升高到 20 km 的仪器上限。

PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的垂直分布差异可以通过相对湿度垂直分布特征获得解释,从图 7 中可见雾前(11 月 29 日)3 层高度相对湿度大体相当(60%~80%),且变化趋势一致,这与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的垂直分布差异规律一致,表明霾日近地层内各高度气象特征和空气成分较为均一,表现为出显著的区域污染特征。雾日期间(11 月 30 日至 12 月 1 日)地面相对湿度稳定维持在 80%以上,120 和 220 m 处相对湿度较低,尤其是雾强度最大的 12 月 1 日 06 时,地面相对湿度高于 90%,而 120 m 处相对湿度仅为 53%,220 m 处则低至 36%,表明雾层较薄,其厚度在 120 m 以内;其后随着 12 月 1 日的降温过程,水汽冷凝,相对湿度增大,雾获得了进一步发展,从 1 日 20 时至 2 日 09 时,虽然大气能见度有所增高(1.42±0.16 km),并不完全满足本文关于雾的能见度判据(低于 1 km),但地面、120 和 220 m 3 层相对湿度均在 90%以上,表明近地层内水汽混合均匀,高相对湿度导致气溶胶发生吸湿性增长,不同高度 PM<sub>2.5</sub> 浓度均逐渐增大,同时近地层逆温造成气

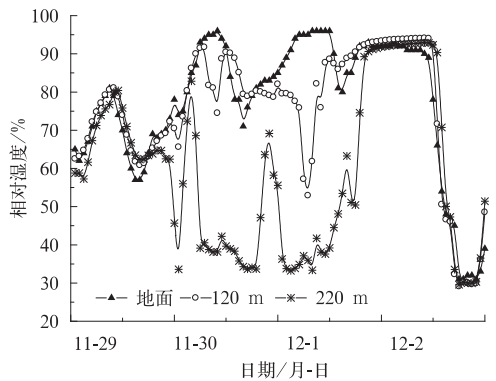


图 7 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日天津次雾霾过程相对湿度的垂直分布  
 Fig. 7 Daily variations in vertical distributions of RH from 29 November to 2 December 2009

溶胶混合均匀,至 2 日午间达到 3 层较为一致的高值。2 日午后伴随着风向转变为西北风,气温也快速升高,相对湿度迅速下降,连续多日的雾霾天气消散,PM<sub>2.5</sub>质量浓度降低,大气能见度迅速恢复至 10 km 以上,雾的消亡过程也代表着本轮气溶胶污染过程的结束。

### 3 结 论

2009 年 10—12 月天津大气能见度平均值为 10.8 km,雾霾等低能见度天气占观测时长的一半以上,其中以霾天气为主,不同天气下 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>质量浓度存在较大的差异,具体体现在雾阶段气溶胶质量浓度最高,霾和轻雾日浓度相当,并且 PM<sub>2.5</sub>在 PM<sub>10</sub>中所占比例较高。

以 2009 年 11 月 29 日至 12 月 2 日的连续雾—霾—轻雾天气为例,分析气溶胶质量浓度的时空分布特征:霾日近地层内 PM<sub>2.5</sub>分布均匀,40、120 和 220 m 处 PM<sub>2.5</sub>质量浓度平均值依次为 128.43、136.27 和 115.29  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,表现出显著的区域污染特征;从 11 月 29 日至 12 月 1 日 3 天能见度逐日降低,相对湿度逐日增高,表明雾强度逐日增大,气溶胶质量浓度先升高后下降,系气溶胶粒子吸湿性增长与导致可溶性组份溶出的湿清除的协同作用,此外雾后大风对不同粒径粒子的扩散能力不同,是造成 PM<sub>2.5</sub>浓度迅速降低而 PM<sub>10</sub>浓度较高的主要原因;11 月 30 日至 12 月 1 日雾日期间 220 m 处 PM<sub>2.5</sub>质量浓度分别仅为 40 m 处的 34% 和 120 m 处的 38%,其浓度差异与相对湿度的垂直变化及逆温层高度有关,220 m 处相对湿度最低至 36%,远低于 40 和 120 m 处的 80% 以上,表明 220 m 在雾层以外,因而 PM<sub>2.5</sub>质量浓度较低。

### 参考文献

- [1] Watson J G. Visibility: Science and regulation[J]. J Air and Waste Management Association, 2002, 52(9): 628-713.
- [2] 段玉森,束炯,张弛,等.上海市大气能见度指数指标体系的研究[J]. 中国环境科学, 2005, 25(4): 460-464.
- [3] 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.
- [4] 黄健,吴兑,黄敏辉,等. 1954—2004 年珠江三角洲大气能见度变化趋势[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 61-70.
- [5] 张浩,石春娥,谢伟,等.安徽省 1955—2005 年城市大气能见度变化趋势[J]. 气象科学, 2008, 28(5): 515-520.
- [6] 林盛群,林莽,万军明,等.香港大气能见度与污染物长期变化的特征和相互关系[J]. 中国环境科学, 2009, 29(4): 351-356.
- [7] 郭军.天津地区灰霾天气的气候特征分析[J]. 城市环境与城市生态, 2008, 21(3): 12-14.
- [8] 王炜,解佳宁,路宗敏,等.天津市大气能见度与空气污染物关系分析及控制措施[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(12): 48-53.
- [9] 吴彬贵,解以扬,吴丹朱,等.京津塘高速公路秋冬季低能见度及应对措施[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 12-17.
- [10] 周慧,解以扬,高鹰.京津塘高速公路大雾天气气候特征及其对交通的影响[J]. 公路, 2008, (11): 149-154.
- [11] 张德山,魏建明,陈廷良,等.首都机场高速公路能见度预报方法[J]. 气象科技, 2002, 30(6): 358-361.
- [12] 范引琪,李春强. 1980—2003 年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1392-1400.
- [13] 范引琪,李二杰,范增禄.河北省 1960—2002 年城市大气能见度的变化趋势[J]. 大气科学, 2005, 29(4): 526-535.
- [14] 姚青,张长春,樊文雁,等.天津冬季大气能见度与空气污染的相互关系[J]. 气象科技, 2010, 38(6): 704-708.
- [15] 张凯,柴发合,陈义珍,等.天津武清能见度特征分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(6): 800-806.
- [16] 王淑英,徐晓峰.北京地区低能见度的气候特征及影响因素[J]. 气象科技, 2001, 29(4): 23-26.
- [17] 于凤莲,刘东贤,胡英.有关气溶胶细粒子对城市能见度影响的研究[J]. 气象科技, 2002, 30(6): 379-383.
- [18] 樊文雁,胡波,王跃思,等.北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(6): 631-648.
- [19] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社, 2003: 21-27.
- [20] 吴兑.关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 2005, 31(4): 3-7.
- [21] 吴兑.再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, 32(4): 9-15.
- [22] 中国气象局.霾的观测和预报等级. QX/T 113-2010 中华人民共和国气象行业标准[S].北京:气象出版社.
- [23] 中国天气网.罕见大雾强袭专家表示大雾预报难度大[EB/OL]. 2009-12-03. <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20091203/159058.shtml>.
- [24] 孙政玲,穆怀斌,吴丹朱,等.天津城区秋季 PM<sub>2.5</sub>质量浓度垂直分布特征研究[J]. 气象, 2008, 33(10): 60-66.
- [25] 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.
- [26] 吴兑,邓雪娇,毕学岩,等.细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 1-6.
- [27] 叶光营,吴毅伟,刘必桔.福州区域雾霾天气时空分布特征分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 114-119.
- [28] 史军,崔林丽,贺千山,等.华东雾和霾日数的变化特征及成因分析[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 533-542.
- [29] 周小刚,王强.北京城市重烟尘雾与水雾过程的边界层结构[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 404-409.
- [30] 吉东生,王跃思,孙扬,等.北京大气中 SO<sub>2</sub> 浓度变化特征[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(1): 69-76.