

樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 2009. 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, 14 (6): 631–638. Fan Wenyan, Hu Bo, Wang Yuesi, et al. 2009. Measurements on the vertical distribution of PM_{2.5} concentration in fog and haze days in Beijing City [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 631–638.

北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测

樊文雁^{1,2} 胡波² 王跃思² 王式功¹ 孙扬²

¹ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 近年来北京城市区域雾霾天气显著增加, 不仅严重影响工农业生产和交通运输, 还严重影响人体健康。2007年夏秋季节, 北京 325 m 气象塔 8、80 和 240 m 平台梯度观测结果表明, 雾、霾、晴三种典型天气状况大气细粒子质量浓度垂直分布各有特点, 雾天 (11 月 5~6 日) 低层浓度明显偏高, 6 日从低到高 3 层 PM_{2.5} (空气动力学直径小于等于 2.5 μm 的大气气溶胶) 浓度日均值分别为 352.6 ± 79.3 、 224.7 ± 69.0 、 $214.8 \pm 32.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 霾天 (8 月 19~20 日) 细粒子上下混合均匀, 19 日从低到高 3 层 PM_{2.5} 浓度分别为 89.8 ± 29.3 、 88.9 ± 29.8 、 $90.0 \pm 31.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 晴天 (8 月 22~23 日) 细粒子昼夜变化明显, 夜间在 80 m 高度出现明显分层, 23 日 80 m 以下平均值为 $32.6 \pm 13.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 240 m 平均值为 $27.4 \pm 13.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。雾天细粒子主要来源于局地, 霾天细粒子污染表现为时空分布十分均匀的城市群区域污染特征且污染物积累; 连续晴天细粒子明显被清除。

关键词 雾 霾 PM_{2.5} 梯度变化

文章编号 1006-9585 (2009) 06-0631-08 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Measurements on the Vertical Distribution of PM_{2.5} Concentration in Fog and Haze Days in Beijing City

FAN Wenyan^{1,2}, HU Bo², WANG Yuesi², WANG Shigong¹, and SUN Yang²

¹ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Fog and haze days in Beijing are significantly increasing in recent years, which can influence traffic, industry, and agriculture seriously. Furthermore, the toxicant aerosol particulate can harm human health seriously. In order to identify the vertical distribution of particulate matter with aerodynamic diameter less than 2.5 μm (PM_{2.5}) under different weather conditions, three instruments used for measuring the mass concentration of PM_{2.5} were installed on 8, 80, and 240 m platform in 325-m Beijing meteorological tower during the summer and autumn of 2007. Results show that there are obvious differences in the vertical distribution of PM_{2.5} concentration under different weather conditions. During the foggy period (5–6 November), the daily average PM_{2.5} concentrations at 8, 80, and 240 m were 352.6 ± 79.3 , 224.7 ± 69.0 , and $214.8 \pm 32.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, on 6 November, the PM_{2.5}

收稿日期 2008-04-09 收到, 2009-07-30 收到修定稿

资助项目 国家杰出青年基金 40525016、国家重点基础研究发展规划项目 2007CB407303 和北京市环境保护科技项目 200608

作者简介 樊文雁, 女, 1983 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为大气化学。E-mail: fwy@dq.cern.ac.cn

通讯作者 王跃思, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

concentration altered obviously. In haze days (19–20 August), PM_{2.5} mixed uniformly, the daily average concentrations at 8, 80, and 240 m were 89.8 ± 29.3 , 88.9 ± 29.8 , and $90.0 \pm 31.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ on 19 August. During the sunny days (22–23 August), the concentrations of PM_{2.5} show a very distinct diurnal variation. There was an obvious vertical layer structure, especially at night. The aerosol mixed uniformly on 23 August. The daily average PM_{2.5} concentrations for 8–80 m and 240 m were 32.6 ± 13.1 and $27.4 \pm 13.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The particles of fog were mainly from local sources. However, the particles of haze were mainly from regional sources, and showed an increasing trend in concentration. There was an elimination process of PM_{2.5} during the continuous fine days.

Key words fog, haze, PM_{2.5}, vertical distribution

1 引言

近年来,城市雾霾天气呈现越来越频繁的趋势,2004年广州市雾霾天气为144天,深圳市达到175天;而2007年,广州市区的雾霾天气为153天,深圳的雾霾天高达231天。北京及周边地区的雾霾天气也明显增加,屡次造成多条高速公路关闭,航班取消,医院呼吸道疾病就诊率上升;2005年“法国巡逻兵”飞行表演队在北京的飞行表演也因雾霾天气而两次被迫取消。灰霾和城市雾天气过程不仅导致能见度急剧下降,严重影响正常的工农业生产和交通运输(宋宇等,2003);且城市雾霾中携带了大量有毒、有害的化学成分,对城市人群身体健康造成极大威胁(王平利等,2005;高竹等,2006;白志鹏等,2006;肖红等,2006)。日渐频繁的灰霾天气不仅给首都造成了巨大的经济损失,且对首都的国际形象产生负面的影响。

雾(Fog)、霾(Haze)是自然天气现象。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。它主要是空气中水汽达到(或接近)饱和,在凝结核上凝结而成的。空气中的灰尘、硫酸和硫酸盐、硝酸和硝酸盐、有机碳氢化合物等粒子浓度较大时,也可以使大气混浊、视野模糊,导致能见度下降。如果水平能见度小于10 km时,这种非水成物组成的气溶胶系统称为霾。组成霾的粒子极小,不能用肉眼分辨。当大气凝结核由于各种原因长大时也能形成霾。在这种情况下,水汽的进一步凝结可能使霾演变成轻雾、雾或云(周小刚等,2004;江玉华等,

2004)。由灰尘、烟粒盐粒等粒子组成的霾,散射波长较长的光,因此看起来呈黄色或橙灰色;城市的污染空气中含有许多的碳黑粒子,所以也称这种天气现象为灰霾。在不同的天气条件下,形成霾或者雾,表观差别主要在于水汽含量的多少,或者是大气相对湿度的高低,我国不同区域有不同的临界点,实质上为颗粒物的理化性质的差异(吴兑,2005)。

霾的形成与气象条件和空气中极细微的尘粒(或称悬浮颗粒物)数量有关(柯昌华等,2002)。气象条件指输送条件和扩散条件,气流停滞区的出现使得悬浮颗粒物不宜扩散到下游地区,逆温层的存在使空气低层中的悬浮颗粒不易扩散到高空。

国内外研究表明,大气中高浓度的细粒子是城市区域形成雾霾天气过程的主要原因。细粒子是指空气动力学等效直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的大气气溶胶粒子,也称PM_{2.5}。PM_{2.5}对人体健康的危害已经被国内外大量的流行病学和毒理学所证实,可随呼吸直接进入肺泡,对人体健康威胁极大(Englert, 2004; Peters, 2005)。此外,PM_{2.5}是大气中主要的光散射物质,高浓度PM_{2.5}导致大气能见度降低;在酸雨形成和大气辐射平衡中,PM_{2.5}也起着举足轻重的作用(Myhre et al., 2001; Verma et al., 2006.)。

目前,对城市雾霾的研究主要集中在城市雾霾的形成与影响,雾与霾的相互转化和细粒子的化学成分上。北京市针对大气颗粒物污染开展了一系列的观测与模式研究,北京市气象局于2007年率先开始预报霾,并将霾分成三级。但是霾的形成机理、与雾的区分判据、分级判据、防控技术与政策等问题均未得到较好解决,特别是对雾

霾的垂直结构特征没有相关研究, 而正是这一点影响着雾霾的判断和预测, 并影响着对雾霾消散过程的科学认识。

本文利用北京 325 m 气象铁塔进行雾霾天气过程大气细粒子近地面垂直特征观测研究, 并应用常规气象观测数据对雾霾天气判定区分, 并比对二者的相关性, 阐述雾霾天气过程细粒子质量浓度垂直梯度变化规律, 为区域协同雾霾防控治理提供相关科学依据。

2 实验与方法

2.1 实验数据

本文所用细粒子的数据源于中国科学院大气物理研究所 325 m 铁塔的分层观测。北京 325 m 气象塔 (39°58'27"N, 116°22'20"E) 位于北京市北三环路与北四环路之间, 东面 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路, 北边 50 m 处为东西走向的北土城西路, 地基海拔高度 50 m。在观测塔的 8、80 和 240 m 处分别安装细粒子观测仪器, 每 10 分钟采集 1 个数据, 连续观测 PM_{2.5} 的质量浓度, 并根据孙鸿良等 (2001) 的研究结果对数据进行质量控制, 保证数据质量。

总辐射和其他气象要素使用 Milos520 (Vaisala, 芬兰) 自动气象站观测, 设置在铁塔 20 m 高度处, 每个传感器每年按照世界气象组织 (WMO) 标准标定一次。

2.2 雾和霾的判定方法—— K_s 判定法

目前, 气象部门主要根据水平能见度和相对湿度不同来区分城市雾和霾天。但各地气象、气候条件差异大, 雾与霾的成因不尽相同, 判别标准也不统一。按照能见度大小把雾霾分为: 轻雾, 能见度 1~10 km; 大雾, 能见度小于 1 km; 霾, 能见度小于 10 km; 中度霾, 能见度 5~8 km; 重度霾, 能见度 3~5 km; 严重霾, 能见度小于 3 km。吴兑 (2006a, 2006b) 和吴兑等 (2006) 在研究中统计了部分地区区分雾与霾的相对湿度标准, 60%~95% 皆有。他们研究认为, 相对湿度小于 80% 时的大气混浊、视野模糊导致的能见度恶化的天气现象应该确定为霾; 相对湿度大于 95% 时的大气混浊、视野模糊导致的能见度恶化确定为雾; 相对湿度介于 80%~95% 之间

时的大气混浊、视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的, 但其主要成分应该是霾。WMO 和其他各国的气象机构给出的雾、霾区分标准中认为, 能见度小于 1 km, 相对湿度接近 100% 时的天气现象是雾; 能见度大于等于 1 km (英国天气局) 或在 1~5 km (WMO) 的范围内, 相对湿度大于等于 95% 时的天气现象为轻雾; 能见度小于等于 5 km, 相对湿度小于等于 95% 的天气现象才是霾。但不管是雾滴还是高浓度的气溶胶粒子, 都会通过散射影响总辐射, 因此本文在参考了国内外有关文献 (Iqbal, 1983) 的基础上, 认为利用晴空指数 (K_s) 和相对湿度 (R_H) 来区分雾和霾更加简便有效。

$$K_s = \frac{G}{H_0},$$

其中, G 是观测的总辐射, H_0 是大气层顶的总辐射。

把 $K_s \geq 0.8$ 天空状况定义为晴天, 而当 $K_s \leq 0.4$ 出现超过 3 h 则为阴霾天气。在阴霾天气中按照 R_H 进一步分类, 当 $R_H > 80\%$ 且没有降雨时定义为雾天; $R_H < 80\%$ 定义为霾天。利用上述方法区分这两种天气, 主要应用了常规的气象资料, 简单易操作, 只要观测 G 和 R_H 即可。

3 结果与讨论

3.1 北京市雾和霾天的区分

利用本文建立的方法和观测资料对北京市区最近 3 年的雾、霾天气判定如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 北京出现的雾霾天气呈现逐年上升的趋势, 而且严重霾天数也随之增加。2005 年全年有 218 天为雾霾天气, 其中雾天为 55 天, 严重霾天数为 63 天, 而 2007 年全年有 247 天为雾霾天气, 其中雾天比 2005 年多了 12 天, 严重霾天数比 2005 年多了 26 天。统计国家环保局公布的 API 指数 (<http://www.zhb.gov.cn/>), 发现 2005~2007 年首要污染物为可吸入颗粒物且 $API > 100$ 的天数分别为 128、123 和 118 天, 而这三年每年雾天和严重霾天之和分别是 116、130 和 131 天, 两者比较接近, 说明本文判定方法合理, 可用于北京地区雾霾区分。

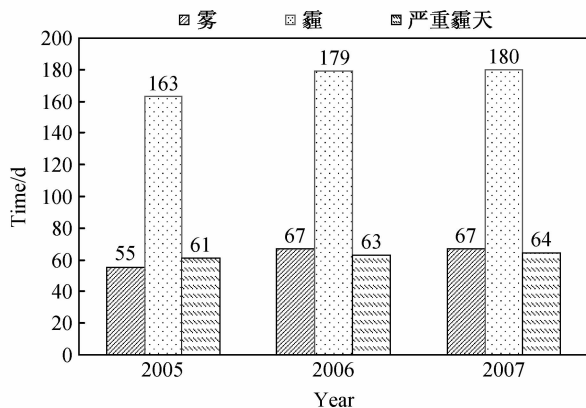


图1 2005~2007年北京市城市雾和霾天统计

Fig. 1 Statistic of fog and haze days in Beijing urban area from 2005 to 2007

3.2 雾霾天能见度和风速风向特征

选取2007年11月7日大雾、2007年8月19日20日霾天为典型个例，与2007年8月22、23日晴天比对，进行雾、霾水平能见度和细粒子垂直分布变化规律的分析。

不同天气的能见度 (http://www.sxqx.gov.cn/gzqxxx/sk_table.php) 存在较大的差异，霾天的能见度变化范围在5~12 km之间，能见度变化为单峰形，在08时（北京时间，下同）有最小值出现，之后缓慢上升，14时出现能见度的最大值；城市雾天的能见度较低，出现大雾时的能见度只有0.8 km，且日变化不明显，雾后能见度上升明显。作为比对，天气晴好时，能见度可达30 km，日变化为明显的双峰形，中午时候能见度较高，早晚则较低（图2a）。

不同天气的风速也存在较大的差异。丁国安等（2005）的研究表明，320 m高度在西南和东南风向条件下PM10（直径小于等于10 μm 的大气气溶胶）和PM2.5均明显出现高浓度值，而其他高度PM2.5和PM10浓度和风向没有关系（见图2b），因此本文仅分析了不同天气状况下的风速。不同季节的持续污染对应不同的风速。秋季持续污染发生概率在70%以上时，风速多集中在2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下，低于1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时污染概率接近80%；夏季持续污染多发时，风速为1~2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。非沙尘天气和浮尘天气时，3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下小风对空气中污染物聚积、污染加重具有显著作用（范焘等，2007；王喜全等，2007）。本文个例分析了

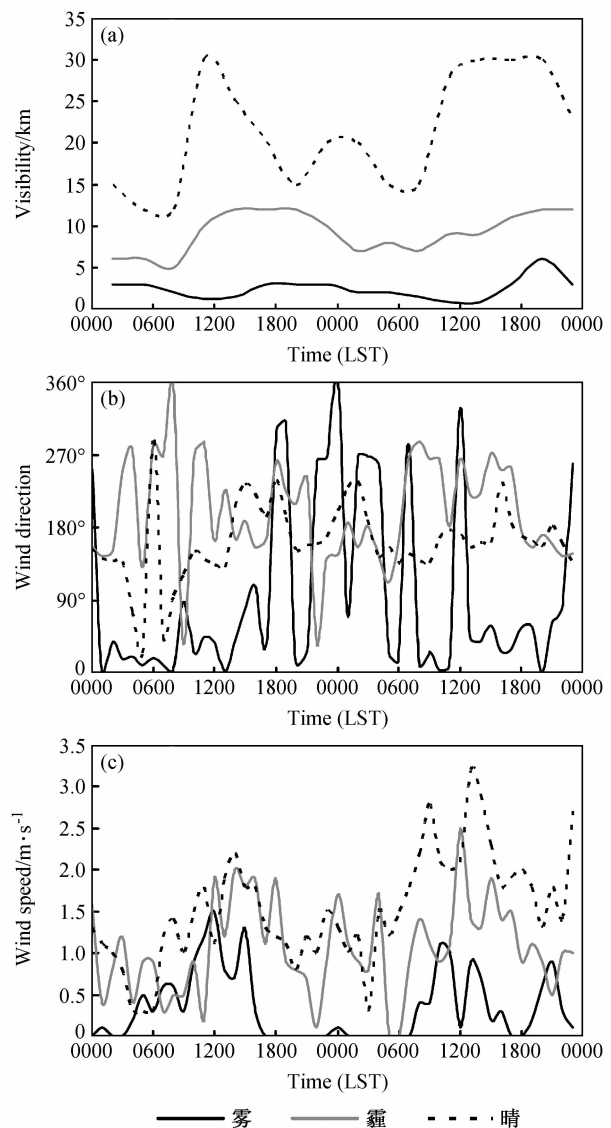


图2 (a) 能见度、(b) 风向和 (c) 风速随时间的变化（雾天：2007年11月6~7日；灰霾：2007年8月19~20日；晴天：2007年8月22~23日）

Fig. 2 Variation of (a) visibility, (b) wind direction, and (c) wind speed (fog days: 6-7 Nov 2007; haze days: 19-20 Aug 2007; sunny days: 22-23 Aug 2007)

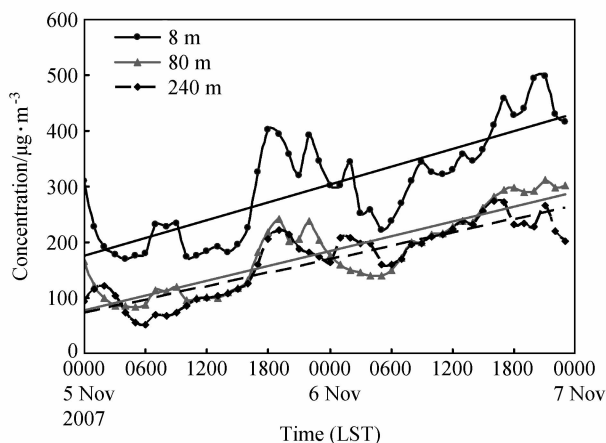
距地面20 m的风速，发现雾天时风速较小或出现静风，平均风速小于0.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；霾天的平均风速则只有1.06 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，而晴天相对风速较大，最大可达到3.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，有利于污染物的扩散（见图2c）。

3.3 雾、霾、晴天PM2.5的垂直梯度变化特征

北京市颗粒物和细粒子的变化特征，已有多人研究。王淑英等（2002）、袁杨森等（2007）和

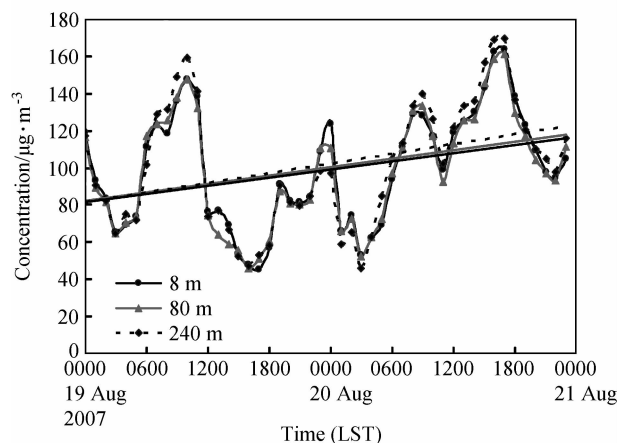
隋珂珂等(2007)的研究结果表明, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度日变化都呈双峰双谷, 一般傍晚至午夜前出现第一峰值, 09 时至 10 时出现次峰值, 约 14 时出现第一低值, 06 时左右出现次低值。该变化与污染物的排放和气象条件的日变化有很大的关系。09 时至 10 时的次高峰可能与上班时间行驶车辆增多有关。一般来说, 白天受日照辐射加强, 地面温度逐渐升高, 大气容易处于不稳定状态, 混合层厚度增加, 大气的湍流交换和垂直扩散能力加强, 有利于可吸入颗粒物的扩散和运移, 颗粒物污染浓度减少。而夜间大气多处于稳定状态, 不利于污染物的稀释、扩散; 另外大卡车(燃烧柴油)夜间可以进城, 其尾气排放的颗粒物比一般燃油车量排放的多, 容易造成颗粒物浓度增高。但雾、霾天气直观表现为水平能见度下降外, 细粒子的垂直分布是否有变化鲜有报导, 本文的初步研究结果认为差异明显。

为了对 11 月 7 日大雾形成的天气过程有一个更加清楚的认识, 本文用了大雾前两天 11 月 5、6 日的 PM_{2.5} 数据进行分析。由于雾主要是近地层的天气现象且雾滴比较大, 所以雾天的 PM_{2.5} 主要集中于近地面, 观测结果为 8 m 的 PM_{2.5} 浓度最高, 240 m 最小(见图 3)。11 月 5 日从低层到高层, PM_{2.5} 质量浓度的日均值分别为 249.7 ± 81.4 、 138.6 ± 53.1 、 $121.6 \pm 51.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 11 月 6 日, 从低到高三层 PM_{2.5} 质量浓度分别为 352.6 ± 79.3 、 224.7 ± 69.0 、 $214.8 \pm 32.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这两天观测到的风速很小, 并在 5 日

图 3 雾天的 PM_{2.5} 变化趋势Fig. 3 Variation of PM_{2.5} concentration in fog days

18 时到 6 日 7 时出现静风, 污染物积累使 PM_{2.5} 质量浓度增长明显, 8、80 和 240 m 三层梯度线性增长率分别是每小时 3.1%、6.0% 和 5.7%。垂直方向从低层到高层 PM_{2.5} 质量浓度下降, 240 m 高度的质量浓度只有 8 m 的一半。尽管浓度差别明显, 但三个高度的变化趋势基本相同, 日变化呈单峰型, 峰值出现在夜间。

从图 4 可以看出, 典型霾天的 8 月 19 日 00 时到 21 日 00 时, 8、80 和 240 m 三层 PM_{2.5} 混合比较均匀且变化趋势相同, 整体都呈现出弱的增长趋势。8 月 19 日, 从低到高三层 PM_{2.5} 日均值分别是 89.8 ± 29.3 、 88.9 ± 29.8 、 $90.0 \pm 31.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 是 WMO 2005 年推荐阈值 $25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 3.6 倍。三层上的 PM_{2.5} 在 00 时至 03 时混合均匀, 浓度差别不是很大, 由于 PM_{2.5} 沉降, 其浓度缓慢下降, 在 03 时出现极小值, 约为 $65 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。之后, 在 100~200 m 的高度上有逆温层的存在, 使低层的 PM_{2.5} 不能向上传输到高空, 无法得到稀释和扩散, 浓度快速上升。该时间段内, 240 m 上的浓度和低层相比, 比低层要低 2~10 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。06 时后, 在人为源和交通源的影响下, PM_{2.5} 浓度表现为跳跃式上升, 直到 10 时达到一天中的最大值, 8 m 和 80 m 上的 PM_{2.5} 质量浓度上升为 $145 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 240 m 上的浓度为 $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 接近日均值的两倍。之后由于边界层的打开, 对流加强, 大气扩散能力增加, PM_{2.5} 混合均匀并减少, 12 时至 16 时, 80 m 的 PM_{2.5} 质量浓度比其他两层的低, 16 时

图 4 霾天的 PM_{2.5} 变化趋势Fig. 4 Variation of PM_{2.5} concentration in haze days

三层都达到最小值, 约为 $45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。值得指出的是, 在 12 时至 16 时这段时间内, 太阳辐射强烈, 光化学作用明显, 也成为高层 PM2.5 的源之一, 故而 240 m 上的 PM2.5 浓度高于 80 m 的。之后 PM2.5 浓度上升直到 20 日凌晨 00 时, 此期间在 20 时、21 时出现平台。20 日的 PM2.5 浓度变化, 也是在凌晨 03 时出现极小值, 之后开始上升直到 08 时, 这段时间的上升与 19 日相比, 没有出现跳跃上升的情况; 09 时后 PM2.5 浓度开始下降直到 11 时, 之后一直上升到 17 时出现极大值, 240 m 上的浓度达到了 $170 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 且高层浓度明显高于其他两层, 可能的原因有两点: 一是气象因素造成的大气扩散能力减弱, PM2.5 的扩散能力比光化学产生能力弱, 故而使 PM2.5 浓度上升; 二是来自区域的输送造成了此高峰。总体上看, 这两天里, 细粒子的浓度都在 09 时出现峰值, 昼夜变化为双峰型。

8 月 22~24 日连续晴天, 夜间开始的偏北风使污染物扩散清除 (见图 5)。表现为 PM2.5 质量浓度逐日下降, 但由于局地源的存在, 日变化呈明显受交通影响的双峰型; 垂直方向上三层变化趋势相同, 但有分层现象。22 日 00 时至 24 时, 夜间 8 m 和 80 m 混合均匀, PM2.5 浓度没有区别; 但 240 m 显然在混合层之外, PM2.5 浓度明显偏低; 白天 80 m 和 240 m 混合均匀, 但 8 m 受到地面源影响, PM2.5 明显偏高。具体分析为: 00 时至 04 时, 80 m 以下出现逆温, 使 PM2.5 向上输送受到阻隔, 表现为 240 m PM2.5 浓度明显

低于 80 m 以下平均浓度; 日出后随着对流扩散不断增强, 逆温层被打破, 8 m 和 80 m 的 PM2.5 浓度开始迅速下降, 在 11 时达到最低值, 但由于人类活动影响, 近地面 8 m 高度 PM2.5 浓度为 $9.64 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 明显高于 80 m 和 240 m PM2.5 浓度 $4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的平均值; 随着午后光化学反应逐渐增强, PM2.5 浓度跳跃上升直到 20 时达到第二峰值, 8、80 和 240 m 峰值浓度分别为 86.7、83.0、83.9 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。23 日 PM2.5 浓度日变化与 22 日相似且浓度继续降低, 从低到高三层日均浓度分别是 32.8 ± 12.9 、 32.3 ± 13.5 、 $27.4 \pm 13.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。只是 80 m 高度 14 时出现一个明显高值, 分析为近距离局地源扩散输送, 12 时有风速达 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风, 可能是距塔 200 m 处高速公路上的汽车尾气所致。

以上实例分析表明, 利用 K_s 判定的雾、霾、晴不同天气状况, 其细粒子垂直分布明显不同, 为判定和区分雾霾天气提供了新的证据, 也为研究不同天气情况下细粒子的详细化学组成和浓度变化提供了分类依据。

4 结论

(1) 在无云或少云的条件下, 利用总辐射测算出 K_s , 结合相对湿度判定和区分雾、霾天气, 方法简便易行, 容易推广。利用细粒子连续观测数据, 结合辐射和相对湿度预测, 即可以对雾、霾天气过程进行预报, 并为相关部门提供预警。

(2) 雾天不同高度 PM2.5 浓度变化规律近似, 但近地层细粒子质量浓度明显高于较高层。浓雾对人类活动频繁的地表区域危害更大。

(3) 霾天大气细粒子时空分布均匀, 表现为城市群区域污染特征。霾的治理, 需要区域协同防控才能有效。

(4) 北京地区静稳天气过程容易出现雾、霾, 并表现为污染物积累上升。污染物浓度水平受区域整体控制, 而日变化形式受局地源影响。

参考文献 (References)

白志鹏, 蔡斌彬, 董海燕, 等. 2006. 灰霾的健康效应 [J]. 环境污染与防治, 28 (3): 198 - 201. Bai Zhipeng, Cai Binbin,

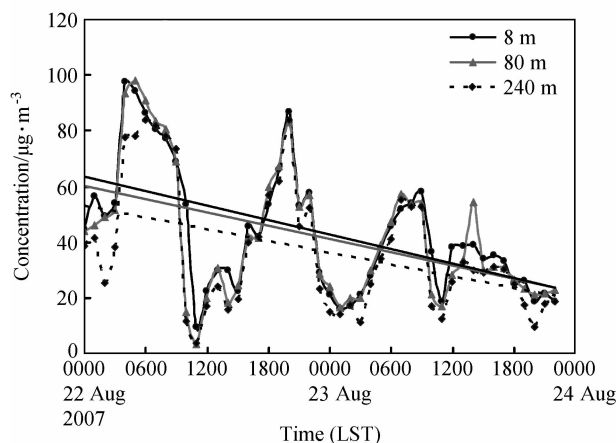


图 5 晴天的 PM2.5 变化趋势

Fig. 5 Variation of PM2.5 concentration in sunny days

- Dong Haiyan, et al. 2006. Adverse health effects caused by dust haze—A review [J]. *Environmental Pollution and Control* (in Chinese), 28 (3): 198–201.
- 丁国安, 陈尊裕, 高志球, 等. 2005. 北京城区低层大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 垂直结构及其动力特征 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 35 (A01): 31–44. Ding Guoan, Chan Chuenyu, Gao Zhiqiu, et al. 2005. Vertical structures of PM₁₀ and PM_{2.5} and their dynamical character in low atmosphere in Beijing urban areas [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 35 (A01): 31–44.
- Englert N. 2004. Fine particles and human health—A review of epidemiological studies [J]. *Toxicology Letters*, 149 (1–3): 235–242.
- 范烨, 郭学良, 付丹红, 等. 2007. 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 [J]. *气候与环境研究*, 12 (1): 49–62. Fan Ye, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2007. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (1): 49–62.
- 高竹, 郭新彪. 2006. 大气 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的健康效应比较 [J]. *中国卫生工程学*, 5 (1): 52–55. Gao Zhu, Guo Xinbiao. 2006. The comparative research on the health effects between PM₁₀ and PM_{2.5} of atmosphere [J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering* (in Chinese), 5 (1): 52–55.
- Iqbal M. 1983. *An Introduction to Solar Radiation* [M]. New York–London: Academic Press, 416pp.
- 江玉华, 王强, 李子华, 等. 2004. 重庆城区浓雾的基本特征 [J]. *气象科技*, 32 (6): 450–455. Jiang Yuhua, Wang Qiang, Li Zihua, et al. 2004. Characteristics of fog in Chongqing urban area [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 32 (6): 450–455.
- 柯昌华, 金文刚, 钟秦. 2002. 环境空气中大气颗粒物源解析的研究进展 [J]. *重庆环境科学*, 24 (3): 55–59. Ke Changhua, Jin Wengang, Zhong Qin. 2002. Study progress on source apportionment of atmospheric particulates in ambient air [J]. *Chongqing Environmental Science* (in Chinese), 24 (3): 55–59.
- Myhre G, Myhre A, Stordal F. 2001. Historical evolution of radiative forcing of climate [J]. *Atmos. Environ.*, 35 (13): 2361–2373.
- Peters A. 2005. Particulate matter and heart disease: Evidence from epidemiological studies [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 207 (2, Supplement 1): 477–482.
- 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 2003. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. *环境科学学报*, 23 (4): 468–471. Song Yu, Tang Xiaoyan, Fang Chen, et al. 2003. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. *Acta Scientiae circumstantiae* (in Chinese), 23 (4): 468–471.
- 隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 2007. 北京 PM₁₀ 持续污染及与常规气象要素的关系 [J]. *环境科学研究*, 20 (6): 77–82. Sui Keke, Wang Zifa, Yang Jun, et al. 2007. Beijing persistent PM₁₀ pollution and its relationship with general meteorological features [J]. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 20 (6): 77–82.
- 孙鸿良, 何曦. 2001. RP1400(a) 测尘仪出现负值的原因分析 [J]. *环境污染与防治*, 23 (2): 92–93. Sun Hongliang, He Xi. 2001. The cause analysis of negative values in TEOM series 1400a [J]. *Environmental Pollution and Control* (in Chinese), 23 (2): 92–93.
- Verma S, Boucher O, Upadhyaya H C, et al. 2006. Sulfate aerosols forcing: An estimate using a three-dimensional interactive chemistry scheme [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (40): 7953–7962.
- 王平利, 戴春雷, 张成江. 2005. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应 [J]. *中国环境监测*, 21 (1): 83–87. Wang Pingli, Dai Chunlei, Zhang Chengjiang. 2005. The study progress in the research for the particular in city air and its effect on human health [J]. *Environmental Monitoring in China* (in Chinese), 21 (1): 83–87.
- 王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 2007. 造成北京 PM₁₀ 重污染的二类典型天气形势 [J]. *气候与环境研究*, 12 (1): 81–86. Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM₁₀ heavy air pollution in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (1): 81–86.
- 王淑英, 张小玲. 2002. 北京 PM₁₀ 污染的气象特征 [J]. *应用气象学报*, 13 (特刊): 177–184. Wang Shuying, Zhang Xiaoling. 2002. Meteorological features of PM₁₀ pollution in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 13 (Special issue): 177–184.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. *气象*, 31 (4): 3–7. Wu Dui. 2005. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 31 (4): 3–7.
- 吴兑. 2006a. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义 [J]. *广东气象*, 1: 9–13. Wu Dui. 2006a. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. *Guangdong Meteorology* (in Chinese), 1: 9–13.
- 吴兑. 2006b. 再论都市霾与雾的区别 [J]. *气象*, 32 (4): 9–15. Wu Dui. 2006b. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 32 (4): 9–15.
- 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. *气象学报*, 64 (4): 510–517. Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 64 (4): 510–517.
- 肖红, 张保森, 魏云慧. 2006. 灰霾天气的危害与预防途径 [J]. *湖北气象*, 3: 44. Xiao Hong, Zhang Baosen, Wei Yunhui.

2006. The hazards and ways to prevent in dust haze [J]. Journal of Hubei Meteorology (in Chinese), 3: 44.
- 袁杨森, 刘大锰, 车瑞俊, 等. 2007. 北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究 [J]. 生态环境, 16 (1): 18 - 25. Yuan Yangsen, Liu Dameng, Che Ruijun, et al. 2007. Research on the pollution situation of atmospheric particulates during Autumn in Beijing city [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 16 (1): 18 - 25.
- 周小刚, 王强. 2004. 北京城市中烟尘雾与水雾的边界层结构 [J]. 气象科技, 32 (6): 404 - 409. Zhou Xiaogang, Wang Qiang. 2004. Mechanism of boundary layer between soot-containing fog and water-containing fog in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 32 (6): 404 - 409.