

# 太原地区冬春季 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素<sup>\*</sup>

孟昭阳<sup>1†</sup> 张怀德<sup>2</sup> 蒋晓明<sup>3</sup> 颜 鹏<sup>1</sup> · 王 雁<sup>2</sup>  
林伟立<sup>1</sup> 周春红<sup>1</sup> 刘洪利<sup>1</sup> 闫世明<sup>2</sup> 梁丽明<sup>4</sup>

(1 中国气象科学研究院 中国气象局大气成分观测与服务中心 大气化学开放实验室, 北京 100081;  
2 山西省气象科学研究所, 太原 030002; 3 防化指挥工程学院, 北京 102205; 4 太原市环境保护局, 太原 030002)  
(2007 年 1 月 19 日收稿; 2007 年 3 月 26 日收修稿稿)

Meng ZY, Zhang HD, Jiang XM, *et al.* The characteristics of  $PM_{2.5}$  and its influencing factors during winter and spring in Taiyuan. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2007, 24(5): 648 ~ 656

**摘 要** 采用美国 R&P 公司生产的 TEOM 系列 1400a 大气粒子( $PM_{2.5}$ )监测仪于 2005 年 12 月 17 日至 2006 年 3 月 28 日对太原地区  $PM_{2.5}$  质量浓度进行在线观测. 对观测期间 2417 个  $PM_{2.5}$  小时平均质量浓度观测数据进行分析, 得到小时平均质量浓度的平均值是  $247.6\mu g/m^3$ , 标准差是  $\pm 193.7\mu g/m^3$ . 在  $50 \sim 100\mu g/m^3$  之间的  $PM_{2.5}$  质量浓度出现的频率最高,  $PM_{2.5}$  小时平均质量浓度小于  $400\mu g/m^3$  出现的频率为 84.1%.  $PM_{2.5}$  质量浓度日变化为双峰双谷型. 太原市区  $PM_{2.5}$  质量浓度与风速、能见度和气压呈负相关, 与相对湿度呈正相关. 通过 3d 后向轨迹分析了影响太原地区气团的主要传输路径, 结果表明, 100m 高度上空的后向轨迹可划分为 7 种基本类型, 其中第 3 类轨迹对应的  $PM_{2.5}$  质量浓度值为  $342.6\mu g/m^3$ , 明显高于其他类型. 这类轨迹主要是来自太原的西南方向; 而来自东边方向的第 1 类轨迹对应的  $PM_{2.5}$  质量浓度为  $261.1\mu g/m^3$ , 也比来自西北方向的 2、4 类轨迹  $PM_{2.5}$  质量浓度高. 观测结果表明, 在沙尘暴影响严重的日期, 太原地区  $PM_{2.5}$  质量浓度会极大地增加, 从而对大气环境形成严重的污染.

**关键词**  $PM_{2.5}$ , 质量浓度, 气象条件, 后向轨迹

**中图分类号** X513; P412.1

## 1 引言

大气气溶胶是当今国际上大气化学研究的前沿领域, 气溶胶的物理化学特征的研究一直是大气环境研究的重要且普遍的问题<sup>[1,2]</sup>. 大气中的悬浮颗粒物因会对人体健康产生直接的负面影响而受到高度重视. 环境监测显示, 可吸入颗粒物  $PM_{10}$  是中国大部分城市的主要空气污染物之一, 太原市 2005 年全年中可吸入颗粒物  $PM_{10}$  是首要污染物的天数为 84%<sup>[3]</sup>. 相对而言, 可吸入颗粒物中的细颗粒物  $PM_{2.5}$  因其粒径较小比表面积较大, 更容易富集有毒物质, 对人体健康的危害远比粗颗粒物大; 而且是引起城市大气能见度降低的重要因素<sup>[4,5]</sup>. 近年来国内外对中国大气  $PM_{2.5}$  所进行的一系列的实验和监测<sup>[6]</sup> 结果显示, 中国气溶胶细粒子污染有相对加剧的趋势.

<sup>\*</sup> 山西省气象局开放式研究基金项目(SX054001)资助

<sup>†</sup>E-mail: mengzy@cma.cma.gov.cn

太原市是山西省省会城市,地处山西省的中部,位于东经  $111^{\circ}30'$  至  $113^{\circ}09'$  和北纬  $37^{\circ}27'$  至  $38^{\circ}35'$  之间.太原市地形以山地、丘陵为主,北、西、东三面环山,中部为汾河冲积扇川地,地势低平,南面是河谷平原,整个地形北高南低逐渐倾斜,属开口向南的簸箕形.太原属北温带大陆性气候,春季温差较大,干旱多风沙;夏季炎热,雨量集中;秋季晴朗,能见度好;冬季干燥寒冷.太原是我国重要的煤炭重工业城市,由于特殊的地理位置和自然环境以及特殊的工业结构、燃料结构等多种因素制约,太原市环境空气质量处于高污染水平,颗粒物污染严重.目前关于太原大气颗粒物细粒子  $PM_{2.5}$  污染的相关研究较少,本文的主要工作就是分析太原地区冬春季  $PM_{2.5}$  污染特征及影响因素.

## 2 采样

$PM_{2.5}$  采样点设在山西省气象科学研究所观测大楼楼顶 ( $37.88^{\circ}N$ ,  $112.53^{\circ}E$ , 距地面 14m), 附近是人口稠密的居住区以及交通繁忙的商业区,气溶胶污染受交通源及周边居民生活排放的影响较大.本文采用美国 R&P 公司生产的 TEOM 系列 1400a 大气粒子 ( $PM_{2.5}$ ) 监测仪于 2005.12.17. ~ 2006.3.28. 对太原地区  $PM_{2.5}$  质量浓度进行在线质量浓度观测.原始数据经平均后得到小时质量浓度值.气象资料来自山西观象台的常规气象观测.

## 3 结果与讨论

### 3.1 $PM_{2.5}$ 小时平均质量浓度污染特征

#### 3.1.1 $PM_{2.5}$ 小时平均质量浓度逐时变化

2005 年 12 月 17 日至 2006 年 3 月 28 日 (共 102d)  $PM_{2.5}$  的小时平均质量浓度的平均值为  $247.6\mu g/m^3$ . 图 1 反映了太原市区  $PM_{2.5}$  质量浓度逐时变化情况.

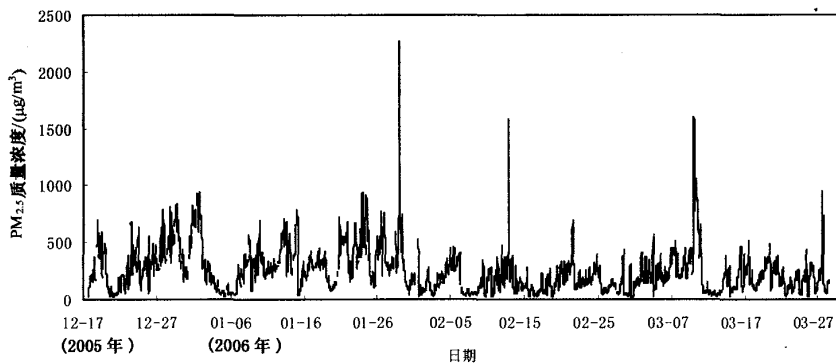


图 1 太原  $PM_{2.5}$  质量浓度逐时变化

由图 1 可见,从 2005 年 12 月 17 日开始,污染物逐渐积累,到 12 月 19 日  $PM_{2.5}$  质量浓度达到高值.将  $PM_{2.5}$  小时平均质量浓度作 24h 平均,得到  $PM_{2.5}$  日平均值为  $410.1\mu g/m^3$ ,20 日  $PM_{2.5}$  质量浓度逐渐降低,21 日空气质量为良.之后,颗粒物浓度的逐渐增大,12 月 29 日  $PM_{2.5}$  日平均质量浓度增加至  $651.1\mu g/m^3$ ,2006 年 1 月 1 日 18:00  $PM_{2.5}$  质量浓度达到峰值 ( $943.1\mu g/m^3$ ),1 月 3 日出现降雪后,污染物浓度明显下降.经过几天空气质量为良好的天气,从 1 月 8 日开始,颗粒物浓度又逐渐积累,到 1 月 13 日颗粒物质量浓度呈现出高值 (日平均值  $500.3\mu g/m^3$ ).1 月 29 日是中国的传统节日春节,在 29 日 01:00 由于鞭炮燃放造成污染物质量浓度小时平均最高值可达  $2260.5\mu g/m^3$ .在随后的观测中,太原市区颗粒物污染较前一段时间为轻,但仍有数个污染高值出现,如 2 月 12 日 (中国的元宵节) 21:00 由于燃放鞭炮颗粒物污染小时平均质量浓度为  $1588.0\mu g/m^3$ ;3 月 10 日 0:00 由于受 3 月 8 ~ 12 日中国北方一次强沙尘暴过程的影响,  $PM_{2.5}$  平均小时质量浓度达到  $1594.5\mu g/m^3$ .3 月 27 日 12:00 受强沙尘暴过程的影响,  $PM_{2.5}$  平均小时

质量浓度为  $953.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 对观测期间 2417 个  $\text{PM}_{2.5}$  小时平均质量浓度观测数据进行分析, 得到小时质量浓度的平均值为  $247.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 标准差为  $193.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

在观测期间  $\text{PM}_{2.5}$  日平均质量浓度均值为  $246.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 最大日平均质量浓度(2006 年 3 月 10 日空气质量状况为重度污染)为  $797.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 最小日平均质量浓度(2006 年 2 月 7 日空气质量状况为优)  $46.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 标准差是  $151.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ . 有关研究报道<sup>[7]</sup>:  $\text{PM}_{2.5}$  占可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )的比例是  $(69 \pm 10)\%$ , 按此来计算, 观测期间太原市区可吸入颗粒物质量浓度的日平均质量浓度是中国国家 2 级标准(适用于居住及商业区的二类区)  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  的 2.4 倍, 观测期间只有 14d 可吸入颗粒物质量浓度小于国家的 2 级标准  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 即超标率为 86%.

据太原市环境保护局公布的空气质量日报<sup>[3]</sup>, 整个观测期间(2005.12.17 ~ 2006.3.28)太原市大气首要污染物为可吸入颗粒物的天数为 53d, 为观测总天数的 52%; 空气质量状况为轻度污染的天数为 39d, 中度污染为 5d, 重度污染为 1d, 良为 54d, 优为 3d. 空气质量级别 I 级的为 3d, II 级为 55d, III 级为 38d, IV 级为 5d, V 级为 1d. 空气质量状况在 III 级以上、甚至达到 V 级的天数占到 43%, 而且空气污染指数(API)在 101 ~ 308 之间, 仅 2006 年 2 月 7 日、8 日, 3 月 13 日这 3d 空气质量状况是优. 由此可知, 太原市区在冬春取暖季节, 大气颗粒物污染非常严重.

### 3.1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均质量浓度频率分布

以  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  为间隔, 统计了观测期间不同质量浓度的  $\text{PM}_{2.5}$  出现的频率(图 2).

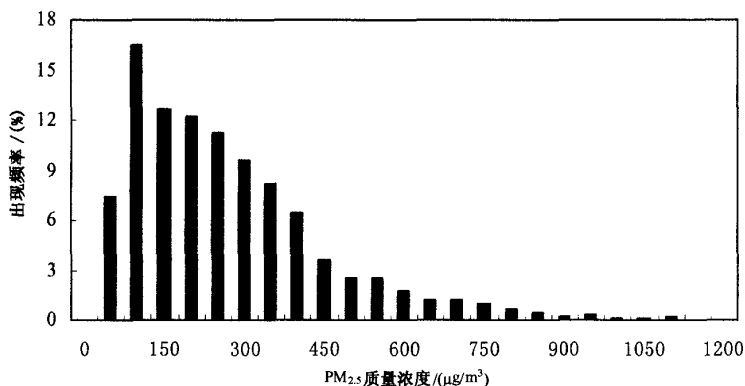


图 2  $\text{PM}_{2.5}$  小时平均质量浓度频率分布总体

由图 2 可见, 在  $50 \sim 100\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度出现的频率最高(16.4%),  $100 \sim 150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $150 \sim 200\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $200 \sim 250\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度出现的频率也比较高, 分别为 12.6%、12.2% 和 11.2%.  $\text{PM}_{2.5}$  小时平均质量浓度小于  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  的频率为 84.1%.

### 3.1.3 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均质量浓度日变化特征

图 3 为观测期间  $\text{PM}_{2.5}$  小时平均质量浓度的平均日变化结果. 从图 3 中可以看出, 太原市区冬春采暖季节 00:00 ~ 09:00 气温较低, 风速不大,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度逐渐富集, 10:00 ~ 12:00 达到高峰, 这可能与上班后车流量密集尾气排放量大有关. 从 14:00 气温升高, 风速加大,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度开始下降, 15:00 ~ 17:00 为峰谷, 可能是混合层高度升高, 大气湍流较大, 混和稀释能力强等综合原因引起. 日落后气温开始下降, 风速减小, 18:00  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度逐渐上升, 在 22:00 达到最大. 午夜前后虽然气温逐渐下降, 风速有所减少, 但污染物排放(如汽车尾气)也大大减小, 因此富集的污染物逐渐扩散,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度下降, 日变化为双峰双谷型.

## 3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与气象条件的关系

空气污染状况与气象条件之间关系密切, 大气环境污染影响气象要素, 气象因素同样也影响大气环境污染状况. 在污染源排放污染物相对平衡的情况下, 气象条件决定了大气对污染物的输送和扩散能

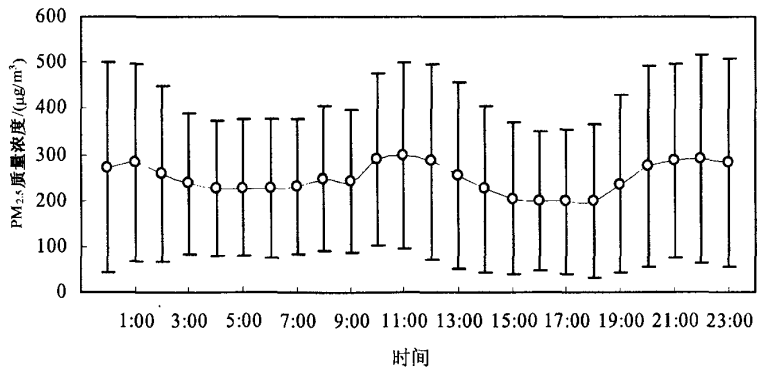


图 3 太原采暖期 PM<sub>2.5</sub>小时平均质量浓度日变化

力<sup>[8]</sup>.为研究 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与气象条件的关系,本文将采样期间的气温、风速、相对湿度、能见度及气压等气象数据进行对比分析,发现气象条件是影响 PM<sub>2.5</sub>质量浓度水平的重要因素之一.观测期间各月的 PM<sub>2.5</sub>小时平均质量浓度、平均气温、平均风速、平均能见度和平均相对湿度见表 1.由表 1 可见,2005 年 12 月、2006 年 1 月、2006 年 2 月和 2006 年 3 月 PM<sub>2.5</sub>平均质量浓度分别为 321.9μg/m<sup>3</sup>、325.5μg/m<sup>3</sup>、162.1μg/m<sup>3</sup>和 214.7μg/m<sup>3</sup>.其中 2006 年 1 月月平均气温 -3.5℃,气温起伏较大,上旬冷空气势力较强.有 2 次较大的降水过程,最大一次降水量达 2.6mm,月总降水量为 3.5mm.平均相对湿度是 66%,月平均风速为 1.7m/s.月总日照时数为 76.5h,与历年同期相比少 96.2h,日照百分率大于 60%的只有 7d.从表 1 可看出,2006 年 1 月 PM<sub>2.5</sub>污染比其他月份都严重.

表 1 气象要素与 PM<sub>2.5</sub>小时平均质量浓度分布特征的关系

观测时间	观测数	平均质量浓度/(μg/m <sup>3</sup> )	平均气温/(℃)	平均风速/(m/s)	平均能见度/km	平均湿度/(%)
2005 年 12 月	323	321.9	-4.8	2.3	8.5	44
2006 年 1 月	698	325.5	-3.5	1.7	5.7	66
2006 年 2 月	663	162.1	-3.9	2.4	11.3	45
2006 年 3 月	659	214.7	6.2	2.5	11.6	36

太原地区逆温出现的频率高,强度大,冬季逆温层厚度大,平均为 490m,最高可达 900m,逆温出现频率为 80%,非常不利于污染物扩散;再加上太原市地处黄土高原半干旱地区,东、西、北三面环山,大气环境受山谷风交替变换影响严重,污染物极易在太原上空积累<sup>[8]</sup>.此外,冬季辐射逆温形成早,消失晚,也是细粒子容易长时间得到富集的重要原因,当冷空气频繁南下,辐射逆温遭到破坏,污染物的扩散则处于有利状态,此时细粒子污染程度降低,因此冬季污染程度波动较大<sup>[9,10]</sup>.

太原地区春季平均风速较大,小风日、高湿度日和有量降水日均处于低谷,具有春季大风干旱的气候特征.3 月份的大风天气过程将上游的沙尘输送到太原,同时当地大风扬尘也引起太原市的能见度下降,气溶胶细粒子浓度剧增.

3.2.1 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与风速的关系

大气低层风速是边界层内影响污染物稀释和扩散的主要因子.

由图 4 可看出风速大小与 PM<sub>2.5</sub>质量浓度有明显的负相关.以 2006 年 1 月为例,1 月份平均风速为 1.7m/s,最大小时平均风速出现在 1 月 5 日 22:00 为 6.8m/s,对应 PM<sub>2.5</sub>质量浓度为 62.5μg/m<sup>3</sup>.最小小时平均风速为 0.3m/s,1 月份共出现 8 次,相应这 8 次的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度平均为 454.5μg/m<sup>3</sup>.1 月份小时平均风速小于 1.0m/s 出现的次数为 171 次,其频率为 23%,一般是清晨和夜间出现较多,对应这段时间 PM<sub>2.5</sub>质量浓度平均为 398.1μg/m<sup>3</sup>.这说明气溶胶细粒子的高浓度数值一般发生在大气环境小风和静风的情

况下,2005 年 12 月~2006 年 1 月共有 5 次重污染过程,其中 2006 年 1 月 13 日为中度污染,日平均风速只有 0.99m/s,在 5 个重污染日,日平均风速均 $\leq 1.3\text{m/s}$ .1 月份小时平均风速大于 3.0m/s 出现的次数为 48 次, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度平均为  $139.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,即随着风速增大,气溶胶细粒子的质量浓度相应减小.

2005 年 12 月 21 日、2006 年 1 月 6 日、2 月 7 日和 3 月 13 日空气质量为良好或优,由于受到较大风速的影响, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度很低,分别为  $62.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $61.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $46.9\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $53.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

随着风速的不断提高,颗粒物质量浓度逐渐降低,最终达到一临界值.此时风速若再增加,颗粒物质量浓度反而上升.这是因为风速过大时,大风会卷起途径地带及本地的粉尘颗粒,使污染物浓度升高.

图 4 太原  $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和气象要素的对比图

### 3.2.2 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与相对湿度的关系

相对湿度与PM<sub>2.5</sub>质量浓度呈正相关,发生降水的天气除外,当空气中水汽多时,可以使PM<sub>2.5</sub>在空气中停留,造成污染增大.2006年1月1日平均相对湿度为97.4%,1月21日平均相对湿度为93.9%,PM<sub>2.5</sub>日平均质量浓度分别为752.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和543.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .1月13日为中度污染,这一天日平均相对湿度也达到了76%.当出现降水天气时,降水将大气中的污染物夹带、溶解或冲刷下来,使污染物浓度降低.由于PM<sub>2.5</sub>为大气中悬浮的粒径较细的颗粒物,湿沉降是主要的清除方式.2006年1月3~4日有一次降雪过程,4日PM<sub>2.5</sub>日平均质量浓度为78.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,污染水平降低.

2005年12月21日、2006年1月5日、2月7日和3月13日PM<sub>2.5</sub>质量浓度很低,日平均相对湿度分别为25.9%、45.8%、36.4%和21.5%.

### 3.2.3 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与能见度的关系

研究表明<sup>[11]</sup>,空气中飘浮的细小颗粒物对光具有吸收和散射作用,颗粒物的增加会导致大气透明度降低,使大气能见度恶化,空气中的颗粒物细粒子大部分来自大气污染物的排放和转化,因此能见度的变化与空气污染程度的变化密切相关.由图4可发现,能见度水平和细粒子PM<sub>2.5</sub>污染水平呈现较好的负相关,即当PM<sub>2.5</sub>质量浓度开始升高时,能见度便开始下降,而且能见度的波峰和波谷往往是PM<sub>2.5</sub>质量浓度的波谷和波峰.2006年1月5日~7日3d的日均能见度很高,分别为12.2km、16.9km和11.3km,这3dPM<sub>2.5</sub>质量浓度较低,空气质量为良;而1月1日和1月24日能见度只有1.6km和2.1km,PM<sub>2.5</sub>日平均质量浓度分别为752.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和558.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

2005年12月21日、2006年1月5日、2月7日和3月13日PM<sub>2.5</sub>质量浓度很低,日平均能见度分别为21.9km、16.9km、22.9km和19.1km.

### 3.2.4 PM<sub>2.5</sub>质量浓度与气压的关系

以1月为例,太原2006年1月的平均气压为933.7hPa,由图4可知,1月5日03:00气压达到峰值为945.1hPa,对应的PM<sub>2.5</sub>质量浓度为44.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,当气压为最低值920.8hPa(1月28日16:00)时,对应的PM<sub>2.5</sub>质量浓度较高为255.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,说明太原地区近地面气压值基本和气溶胶细粒子质量浓度呈负相关.因为在低气压场天气形势下,多静风现象,这就间接造成了城市气溶胶细粒子不易扩散,质量浓度偏高.北方低气压、均压场是污染较重的天气类型,对于气溶胶细粒子的影响,低压天气形势时多有低云阻挡垂直扩散,强高压天气形势时对气溶胶细粒子的影响与其他气象条件配置状况有关.

## 3.3 空气气团轨迹分析

空气气团轨迹用于描述空气质点运动的来向和去向,可用来辅助分析空气中气溶胶的输送路径、来源及去向等.本研究应用轨迹模式HYSPLIT4.1(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory, Roland R Draxler, 1997)结合美国环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合执行的全球大气再分析计划的产品——每6h再分析气象资料计算太原观测点上空的后向轨迹.在观测期间每天4个时次,分别为00:00、06:00、12:00、18:00(UTC),每个时次选距地高度为100m高度层次计算分析.每个时次计算72h后向轨迹,计算得到的轨迹时间分辨率1h.最后,利用聚类分析方法,把得到的

轨迹按照相似性的程度大小归并成类(组).图5是观测期间在100m高度各组后向轨迹的平均轨迹图.从图5上可看出,100m高度上空的后向轨迹可划分为7种基本类型,即7类,它占总数(总404条)的96.3%,以偏西或西北气流为主.这7类轨迹数分别是50,186,62,59,16,10和8,以前4类轨迹为主.

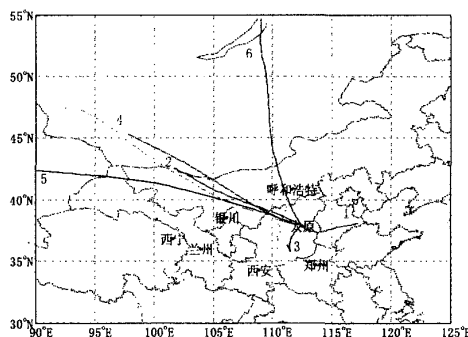


图5 观测期间100m高度后向轨迹图

把每条轨迹对应的时间前 3h 和后 3h 内  $PM_{2.5}$  的质量浓度进行平均,并与轨迹的类对应分类,对每一类的质量浓度分别做统计分析,其结果见表 2.

表 2 后向轨迹和  $PM_{2.5}$  质量浓度的统计结果

轨迹类型	1	2	3	4	5	6	7
平均高度/hPa	963	852	904	783	762	796	726
每类的轨迹数	50	186	62	59	16	10	8
$PM_{2.5}$ 平均质量浓度/ $(\mu g/m^3)$	261.1	225.6	342.6	203.4	359.3	86.6	156.2
质量浓度中位数/ $(\mu g/m^3)$	249.1	199.1	316.4	164.4	301.5	57.3	162.5
标准偏差/ $(\mu g/m^3)$	167.8	168.5	166.1	148.0	232.7	58.8	48.6
$PM_{2.5}$ 最小质量浓度/ $(\mu g/m^3)$	51.7	31.1	73.2	29.2	108.1	52.5	92.9
$PM_{2.5}$ 最大质量浓度/ $(\mu g/m^3)$	881.5	1049.1	835.3	584.9	801.9	237.3	214.4
置信度(95.0%)	47.7%	24.4%	42.2%	38.9%	124%	42.1%	40.6%

由表 2 可见,在前 4 类中,第 3 类轨迹对应的  $PM_{2.5}$  质量浓度值明显高于其他 3 类, $PM_{2.5}$  平均质量浓度为  $342.6\mu g/m^3$ ,这类轨迹主要是来自太原的西南方向,在同样的时间内轨迹所经过的距离最短,轨迹运动高度也相对低.平均轨迹运动高度最低的第一类轨迹对应的  $PM_{2.5}$  质量浓度为  $261.1\mu g/m^3$ ,也比来自西北方向的 2、4 类轨迹高,它主要来自东边.第 5 类轨迹对应的  $PM_{2.5}$  平均质量浓度虽然高为  $359.3\mu g/m^3$ ,但质量浓度的标准偏差也大为  $232.7\mu g/m^3$ ,对应的质量浓度离散较大.第 2 类轨迹所占的比例最大轨迹数为 186, $PM_{2.5}$  质量浓度最大值  $1049.1\mu g/m^3$  出现在这类轨迹中.从轨迹-质量浓度聚类统计的结果来看,太原及邻近地区局地的污染相对突出,不同来源的气流极大影响了局地的  $PM_{2.5}$  质量浓度.

3.4 沙尘天气过程分析

2006 年 3 月 9~12 日是中国北方入春以来发生的第 1 次大范围强沙尘暴天气过程,也是仅 7a 出现最早的强沙尘暴过程.这次过程的主要影响系统是蒙古气旋和地面冷锋,冷空气为西北路径,由蒙古国西部影响中国.3 月 8 日 14 时在蒙古国西部开始出现扬沙、沙尘暴,9 日 14 时蒙古气旋位于蒙古国东南部与中国浑善达克沙地交界处,并开始影响中国内蒙古中西部、宁夏北部等地区<sup>[12]</sup>.太原地区观测点 3 月 9 日 22:00 和 23:00 观测到  $PM_{2.5}$  小时平均质量浓度分别为  $743.3\mu g/m^3$  和  $1167.8\mu g/m^3$ .10 日 0:00,  $PM_{2.5}$  小时平均质量浓度达到  $1594.5\mu g/m^3$ ,10 日 1:00 和 2:00 $PM_{2.5}$  小时平均质量浓度分别为  $1574.7\mu g/m^3$  和  $1035\mu g/m^3$ .10 日 20:00 过程结束.图 6 为 CUACE-Dust 系统模拟的沙尘暴数值预报质量浓度图,反映了 2006 年 3 月 9 日 23 时~3 月 10 日 02 时地面粒径小于  $40\mu m$  的沙尘粒子质量浓度.深颜色符号为气象台站观测到的沙尘暴天气现象信息.

图 6 沙尘暴数值模拟质量浓度图

由中国气象局大气成分观测与服务研究中心研究开发的亚洲沙尘暴数值预报系统 CUACE-Dust(China  
万方数据

Unified Atmospheric Chemistry Environment-DUST)以沙尘气溶胶微物理为基础,包含沙尘气溶胶的起沙和干湿沉降等过程.该系统依托中尺度气象模式,开发了沙尘气溶胶的平流输送和小尺度耗散方案. CUACE-Dust 同时配有中国 FY-2C 卫星反演沙尘暴空间分布以及地面沙尘暴观测资料的同化系统,同时还配有基于中国最新地表特征的沙蚀资料库.系统网格点是  $68 \times 85$ ,水平格距是 108km,中心点为 ( $42^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\text{E}$ ).垂直分层为 17 层.

从图 6(a)可看出,2006 年 3 月 9 日 23 时太原地区粒径小于  $40\mu\text{m}$  的沙尘粒子质量浓度达到  $4044.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ .与此同时地面观测 PM<sub>2.5</sub>质量浓度为  $1167.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

图 6(b)则显示 2006 年 3 月 10 日 02 时太原地区粒径小于  $40\mu\text{m}$  的沙尘粒子质量浓度达到  $1870.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ .地面观测 PM<sub>2.5</sub>质量浓度为  $1035\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

3 月 10 日 PM<sub>2.5</sub>日平均质量浓度为  $800.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,空气质量状况为重污染.

3 月 27 日太原观测点又一次观测到由强沙尘暴引起的扬沙天气过程,此次强沙尘暴过程于 3 月 26 日晨起源于蒙古国南部,26 日中午影响到内蒙古大部.27 日在其向南推进的过程中,在鄂尔多斯高原干旱区和东北沙源地得到补充,形成一个从西北东部-华北-东北南部的带状沙尘暴天气过程<sup>[12]</sup>.3 月 27 日 12:00 PM<sub>2.5</sub>平均小时质量浓度达到高值为  $953.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,27 日 17:00 沙尘过程结束.3 月 27 日 PM<sub>2.5</sub>日平均质量浓度为  $251.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

观测结果说明在沙尘暴影响严重的日期,太原地区 PM<sub>2.5</sub>质量浓度会极大地增加,从而对大气环境形成严重的污染.

## 4 结论

通过研究 2005 年 12 月 17 日至 2006 年 3 月 28 日太原地区气溶胶细粒子 PM<sub>2.5</sub>变化规律及其与该地区气象条件和气团轨迹的关系,得出如下结论:

(1)太原地区冬春采暖季节 PM<sub>2.5</sub>小时质量浓度的平均值  $247.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,标准差是  $193.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ .按 PM<sub>2.5</sub>占可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)的比例是  $(69 \pm 10)\%$  来计算,观测期间太原市区可吸入颗粒物浓度的日平均质量浓度是国家 2 级标准(适宜于居住及商业区的二类区) $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  的 2.4 倍,超标率为 86%.太原市区在冬春取暖季节,大气颗粒物污染非常严重.

(2)在  $50 \sim 100\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度出现的频率最高,PM<sub>2.5</sub>小时平均质量浓度小于  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  出现的频率为 84.1%.PM<sub>2.5</sub>质量浓度日变化为双峰双谷型.

(3)气象条件是影响 PM<sub>2.5</sub>质量浓度水平的重要因素之一.由于受多种气象因子的综合影响,以及各气象因子之间的相互作用,PM<sub>2.5</sub>质量浓度与气象条件的关系比较复杂.

(4)对冬春采暖季节太原地区气团轨迹进行跟踪研究表明,来自太原的西南方向的轨迹对应的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度值明显高于其他类型轨迹,且轨迹所经过的距离最短,轨迹运动高度也相对低.从轨迹-浓度聚类统计的结果来看,太原及邻近地区局地的污染相对突出,不同来源的气流极大影响了局地的 PM<sub>2.5</sub>质量浓度.

(5)观测到 2 次由强沙尘暴引起的扬沙天气过程,2006 年 3 月 10 日 0:00,PM<sub>2.5</sub>小时平均质量浓度达到  $1594.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,日平均质量浓度为  $800.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,空气质量状况为重污染.沙尘暴天气造成的大气污染是极其严重的.

## 参考文献

- [1] Wang AP. Advance of the new research on aerosol. *Environmental Chemistry*, 1998, 18(1):10~15 (in Chinses)  
汪安璞.大气气溶胶研究新动向.环境化学,1998, 18(1):10~15
- [2] Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, et al. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001: The scientific basis.5. aerosols, their direct and effects. London: Cambridge University Press, 2001.289~348



- [3] <http://www.tyshbj.com.cn/newweb/index.asp?strlanmu=souye>
- [4] Zhang RJ, Wang MX, Xia XG. Chemical composition of aerosols in winter/ spring in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 14(1): 7 ~ 11
- [5] Dockery, DWSJ, Spengler JD. Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosol. *Atmospheric Environment*, 1992, 59: 362 ~ 373
- [6] Mao JT, Zhang JH, Wang MH, et al. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(5): 625 ~ 634 (in Chinese)  
毛节泰, 张军华, 王美华, 等. 中国大气气溶胶研究综述. *气象学报*, 2002, 60(5): 625 ~ 634
- [7] Keywood MD, Ayers CP, Gras JL. Relationship between size segregated mass concentration data and ultrafine particle number concentration in urban areas. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 2907 ~ 2913
- [8] Han AM. Analysis of meteorological condition of air pollution in Taiyuan. *Taiyuan Sci-Tech*, 2005, 4: 26 ~ 28 (in Chinese)  
韩爱梅. 太原市大气污染气象条件分析. *太原科技*, 2005, 4: 26 ~ 28
- [9] Wang JL, Xie Z, Zhang YH, et al. The research on the mass concentration characteristics of fine particles in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(1): 104 ~ 111 (in Chinese)  
王京丽, 谢 庄, 张远航, 等. 北京市大气细粒子的质量浓度特征研究. *气象学报*, 2004, 62(1): 104 ~ 111
- [10] Wang JL, Liu XL. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of  $PM_{2.5}$  in Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64 (2): 221 ~ 228 (in Chinese)  
王京丽, 刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探. *气象学报*, 2006, 64(2): 221 ~ 228
- [11] Wang SY, Zhang XL, Xu XF. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing. *Meteorological Science and Technology*, 2003, 31(2): 109 ~ 114 (in Chinese)  
王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析. *气象科技*, 2003, 31(2): 109 ~ 114
- [12] Zhang XY. Northeast Asian sandstorm during spring in 2006. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)  
张小曳. 2006 年春季的东北亚沙尘暴. 北京: 中国气象出版社, 2006

## The characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors during winter and spring in Taiyuan

MENG Zhao-Yang<sup>1</sup> ZHANG Huai-De<sup>2</sup> JIANG Xiao-Ming<sup>3</sup> YAN Peng<sup>1</sup> WANG Yan<sup>2</sup>  
LIN Wei-Li<sup>1</sup> ZHOU Chun-Hong<sup>1</sup> LIU Hong-Li<sup>1</sup> YAN Shi-Ming<sup>2</sup> LIANG Li-Ming<sup>4</sup>

(1 Key Laboratory for Atmospheric Chemistry of CMA, Center for Atmospheric Watch and Services of CMA,  
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2 Shanxi Meteorological Sciences Institute of PLA, Taiyuan 030002, China; 3 Chemical Defense Institute of PLA, Beijing 102205, China;

4 Taiyuan Environmentprotection Bureau, Taiyuan 030002, China)

**Abstract** Continuous observation of  $PM_{2.5}$  was conducted in Taiyuan during high pollution seasons from 17 December 2005 to 28 March 2006.  $PM_{2.5}$  samples were collected using TEOM series 1400a ambient particulate monitor (Rupprecht & Patashnick Co., Inc, USA). The study showed that the concentrations of  $PM_{2.5}$  were high during winter and spring in Taiyuan. The average hourly mass concentration of  $PM_{2.5}$  was  $(247.6 \pm 193.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$ , which showed fine particles pollution was serious in Taiyuan. The frequency of hourly averages  $PM_{2.5}$  concentrations less than  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  is 84.1%. The  $PM_{2.5}$  concentration has an obvious diurnal variation. The meteorological conditions have significant effects on the ambient concentrations of  $PM_{2.5}$ . The wind speed, relative humidity, and atmospheric pressure were major factors that influence the concentration variation of  $PM_{2.5}$ . The 3 d air mass backward trajectories were calculated and clustered to analyze transport pathways of the air pollution in Taiyuan. The 3<sup>rd</sup> cluster trajectory, which moving paths was from the southwest of Taiyuan, had higher average  $PM_{2.5}$  concentration ( $342.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) than other clusters (e.g.  $261.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  from east,  $225.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  from northwest). The concentrations of  $PM_{2.5}$  on sandstorm weather are analyzed.

**Key words**  $PM_{2.5}$ , mass concentration, meteorological conditions, backward trajectories