

# 珠海空气中可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )的时空变化特征

潘建国<sup>1</sup>, 曹军骥<sup>2</sup>, 麦潮安<sup>1</sup>, 李顺诚<sup>3</sup>

(1. 珠海市环境保护监测站, 广东 珠海 519000; 2. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质  
国家重点实验室 陕西 西安 710075; 3. 香港理工大学, 香港)

**摘要:** 选取 2000 年 6 月—2001 年 5 月珠海空气中  $PM_{10}$  的观测数据, 分析其在 3 个监测点( 香洲、前山和吉大 )的时空演变特征。结果表明, 珠海  $PM_{10}$  的年均质量浓度为  $40 \mu g/m^3$  (校正后为  $52 \mu g/m^3$ ), 低于国家  $PM_{10}$  的二级质量标准, 与国内外其他城市相比, 珠海  $PM_{10}$  相对较低, 表明珠海的大气颗粒物污染轻微。2001 年 4 月 14、15 日珠海  $PM_{10}$  日均值显著增高, 达到  $92, 127 \mu g/m^3$ , 对比香港及北方粉尘源区的颗粒物浓度及气团轨迹分析结果可知, 珠海也受到了北方沙尘暴的影响。3 个站点的  $PM_{10}$  月均质量浓度变化主要表现为夏、秋季低, 冬、春季高。珠海市大气  $PM_{10}$  的日变化形式以白天高、夜晚低为主。

**关键词:**  $PM_{10}$ ; 沙尘暴; 珠海

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1001-6929(2003)05-0006-05

## Spatial-Temporal Variations of Atmospheric $PM_{10}$ over Zhuhai

PAN Jian-guo<sup>1</sup>, CAO Jun-ji<sup>2</sup>, MAI Chao-an<sup>1</sup>, LEE Shun-cheng<sup>3</sup>

(1. Zhuhai Environmental Monitoring Station, Zhuhai 519000, China; 2. State Key Lab of Loess & Quaternary Geology Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** Observational data of atmospheric  $PM_{10}$  in Zhuhai city from June 2000 to May 2001 was chosen to analyze the spatial and temporal variation characteristic of  $PM_{10}$  in 3 monitoring stations( Xiangzhou, Qianshan and Jida ). It was shown that the annual average  $PM_{10}$  concentration was  $40 \mu g/m^3$  ( the corrected mass concentration is  $52 \mu g/m^3$  ), which did not exceed the Class II category of the National Ambient Air Quality Standards in China. Compared with other cities in the world, the atmospheric  $PM_{10}$  pollution in Zhuhai is slighter. The daily  $PM_{10}$  concentrations monitored in Zhuhai reached the peak values, being 92 and  $127 \mu g/m^3$  on April 14 and 15, 2001 respectively. In comparison with the particulate matter concentrations of Hong Kong ( nearby ) and Yulin station ( at the Asian Dust Source Regions ), the high  $PM_{10}$  values occurred at Zhuhai and Hong Kong in-phase. This as well as the results of trajectory analysis implied that Northern China dust storms were transported to Zhuhai. The monthly concentrations of  $PM_{10}$  at three stations are at low level in the summer and fall periods and at high level in the winter and spring periods. The daily  $PM_{10}$  concentration is mostly high in the daytime and low at night.

**Key words:**  $PM_{10}$ ; dust storm; Zhuhai

珠海地处广东省珠江三角洲的西南部, 总面积  $7\,649 \text{ km}^2$ , 其中陆地  $1\,514 \text{ km}^2$ 。常住人口 73.9 万, 暂住人口 51.0 万( 2000 年的统计数据 )。珠海市于 1997 年 9 月获得国家环境保护模范城市称号, 1998 年又荣获联合国颁发的“国际改善居住环境最佳范例奖”。在全国 46 个重点城市的空气环境质量统计中, 珠海市空气环境质量一直居于良好状况, 属于国内大气污染最

轻的城市之一。

珠海市环境保护监测站在珠海市建成城区内 ( $58.5 \text{ km}^2$ ) 设立 3 个日常空气监测点( 香洲、前山和吉大 ) 监测珠海市的空气环境质量, 包括大气总悬浮颗粒物( TSP )、可吸入颗粒物(  $PM_{10}$  )、二氧化硫和氮氧化物等。其中  $PM_{10}$  是 2000 年 6 月 5 日后正式增列的监测项目, 采用 TEOM( 锥形振动微天平 ) 自动在线监测仪实时监测( 每小时一个  $PM_{10}$  质量浓度值 )。笔者选取了 2000 年 6 月—2001 年 5 月  $PM_{10}$  的观测数据, 分析其在 3 个监测点的时空变化规律, 为有效地控制大气颗粒物污染提供科学依据。

收稿日期: 2002-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 40205018 ); 香港研究资助

局资助项目( BQ500 )

作者简介: 潘建国( 1960- ) 男, 广东潮州人, 高级工程师。

1 实验方法

珠海市设置 3 个日常监测点:香洲监测点位于珠海市第一中学一教学楼楼顶,高约 20 m,代表居民点和商业区环境;前山监测点位于前山中学一教学楼楼顶,高约 17 m,代表新兴工业区环境;吉大监测点位于海滨公园内 2 层楼的监测站点上,高约 10 m,邻近海滨(约 200 m),作为城市的清洁对照监测点。这 3 个点位每天定时向上级单位(中国环境监测总站,广东省环境监测中心站)报送数据。

所有的 PM<sub>10</sub> 数据由 RP 1400a 型 TEOM(Tapered Element Oscillation Microbalance)自动监测仪(Rupprecht & Patashnick,美国)测得。数据的统计、分析与绘图均使用 Microcal origin 5.0 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 珠海 PM<sub>10</sub> 质量浓度及其与其他城市的对比

珠海市 2000 年 6 月—2001 年 5 月的 PM<sub>10</sub> 日均质量浓度值统计见表 1。

表 1 2000 年 6 月—2001 年 5 月珠海市 3 个站点的 PM<sub>10</sub> 质量浓度  
Table 1 The PM<sub>10</sub> mass concentrations of three stations in Zhuhai city from June 2000 to May 2001  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

时间	香洲	前山	吉大
2000 年 6 月	41 ± 6	46 ± 6	21 ± 9
2000 年 7 月	39 ± 22	47 ± 21	24 ± 13
2000 年 8 月	20 ± 8	29 ± 12	21 ± 14
2000 年 9 月	33 ± 10	44 ± 16	40 ± 19
2000 年 10 月	22 ± 9	36 ± 10	28 ± 15
2000 年 11 月	42 ± 19	46 ± 21	26 ± 29
2000 年 12 月	45 ± 20	50 ± 23	50 ± 25
2001 年 1 月	33 ± 12	48 ± 19	44 ± 28
2001 年 2 月	49 ± 21	45 ± 28	43 ± 24
2001 年 3 月	45 ± 27	50 ± 31	52 ± 34
2001 年 4 月	50 ± 30	51 ± 43	55 ± 11
2001 年 5 月	44 ± 22	39 ± 19	27 ± 10
年平均值	39	44	36

注:质量浓度以平均值 ± 标准偏差表示。

由表 1 可知,2000 年 6 月—2001 年 5 月 PM<sub>10</sub> 的日均值在 20 ~ 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间。香洲、前山和吉大 3 个点的 PM<sub>10</sub> 平均值分别为 39、44 和 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,与国家《大气环境质量标准》的 PM<sub>10</sub> 二级标准(100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )相比,这 3 个点的 PM<sub>10</sub> 质量浓度值均未超标,表明珠海市大气颗粒物污染状况轻微。对比这 3 个站点的年均值可知,吉大点的 PM<sub>10</sub> 年均值最低(36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),这主要是由于该点位于海滨公园,代表城市 PM<sub>10</sub> 的背景浓度。前山点的 PM<sub>10</sub> 年均值最高(44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),表明该站点附近的工业污染源的排放对大气 PM<sub>10</sub> 有明显贡献。香洲点

PM<sub>10</sub> 为 39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,这主要是由于该点位于城市的居民及商业区内,附近无显著的颗粒物排放源。

TEOM 测量空气中的颗粒物时,测得的质量浓度偏低<sup>[1]</sup>。国外的最新研究显示,TEOM 测得的 PM<sub>10</sub> 比在实验室用电子天平称量获得的质量浓度低 30% 左右<sup>[2]</sup>,另外英国大气颗粒物专家组指出<sup>[3]</sup>,对 TEOM 获得的数据采用一个校正因子(1.3)后与其他仪器获得的 PM<sub>10</sub> 数据进行比对。由于未对珠海 TEOM 的监测数据与其他的 PM 监测仪的测量结果进行对比,笔者综合国外的研究成果<sup>[2-3]</sup>,采用 1.3 校正 TEOM 获得的 PM<sub>10</sub> 监测数据。3 个站点 PM<sub>10</sub> 的平均质量浓度为 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,经校正后为 52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图 1 是珠海 PM<sub>10</sub> 平均质量浓度(52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )与国内外其他城市的 PM<sub>10</sub> 浓度水平的对比。如图 1 所示,珠海的 PM<sub>10</sub> 明显低于国内的武汉(124  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )、兰州(181  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )和重庆市(115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[4]</sup>的 PM<sub>10</sub> 质量浓度,也低于美国加利福尼亚州 Rubidoux(77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[5]</sup>、与美国的洛杉矶(51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[5]</sup>、法国的巴黎(58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[6]</sup>和意大利的米兰(55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[7]</sup>的 PM<sub>10</sub> 质量浓度相当,高于英国的伯明翰(25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[8]</sup>和加拿大的多伦多(24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[9]</sup>。对比可知,珠海市大气 PM<sub>10</sub> 污染程度较轻,与国外一些空气质量好的城市(洛杉矶、巴黎和米兰)相差不大,也接近美国 PM<sub>10</sub> 标准。

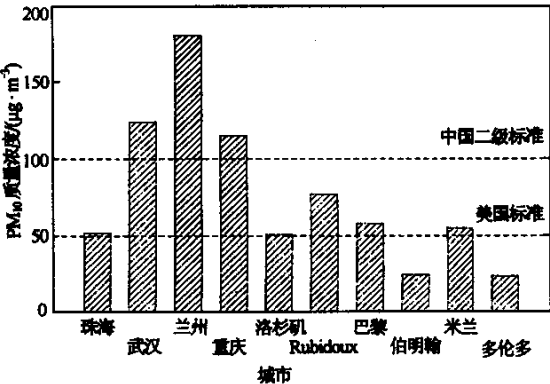


图 1 珠海 PM<sub>10</sub> 质量浓度与其他城市的对比

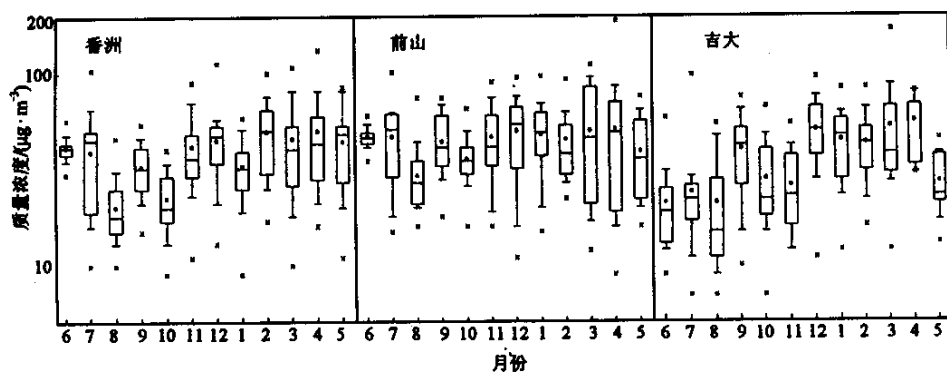
Fig.1 The comparison of PM<sub>10</sub> level at Zhuhai with other cities

2.2 PM<sub>10</sub> 质量浓度的月平均变化

图 2 是 PM<sub>10</sub> 月平均质量浓度的变化图,3 个站的 PM<sub>10</sub> 质量浓度变化不相一致。香洲的夏、秋季(6—11 月)PM<sub>10</sub> 较低,其中 8 月的 PM<sub>10</sub> 平均值最低,为 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。冬、春季(2000 年 12 月—2001 年 3 月)PM<sub>10</sub> 较高,其中 4 月的 PM<sub>10</sub> 质量浓度颇高。夏、秋季 PM<sub>10</sub> 偏

低可能主要是由于珠海的降水较丰富,容易冲刷掉空气中悬浮的  $PM_{10}$  粒子。冬季  $PM_{10}$  偏高可能主要是由于冬季降水较少,城市大气容易形成逆温层,导致  $PM_{10}$  质量浓度偏高。春季  $PM_{10}$  偏高可能有 2 个原因: ①春季降水较少,空气中的  $PM_{10}$  不易被清除; ②受北方沙尘暴的影响,可能导致珠海空气中的  $PM_{10}$  质量浓度增高。对比香洲、前山和吉大点 4 月份的  $PM_{10}$  平均值是 12 个月中最高的,分别为 50、51 和 55  $\mu g/m^3$ 。检查香洲点 4 月份的日平均值可知,4 月 12—17 日的  $PM_{10}$  日均值分别为 73、58、92、127、76、67  $\mu g/m^3$  (详见图 3)。而与珠海毗邻的香港这几日的  $PM_{10}$  日均值分别

为 58、82、109、116、115、81、80  $\mu g/m^3$  (数据由香港环境保护署提供)。珠海与香港相距约 60 km,2 个城市同时在 4 月 12—17 日出现异常高的  $PM_{10}$  质量浓度值(图 3 阴影所示),表明该时段珠江三角洲地区区域空气中的  $PM_{10}$  质量浓度升高,是受到区域颗粒物来源的影响。对比北方沙尘暴的研究数据<sup>[10]</sup>可以发现,4 月 6—11 日中国北方发生了一次强沙尘暴事件(图 3 阴影所示),西北榆林站点(亚洲气溶胶特征实验的一个超级站点)的 TSP 最高日均浓度超过 4 000  $\mu g/m^3$  (见图 3)。已有研究证明,中国北方的沙尘暴对香港也有影响<sup>[11-12]</sup>。5 d 的气团轨迹分析结果也证实,4 月 14—



注: 小方框为  $PM_{10}$  的平均值,最低的小叉为 5% 的分布值,最低的小横为 10% 的分布值,大方框的下边界值为 25% 的分布值,大方框的中间线为 50% 的分布值,大方框的上边界值为 75% 的分布值,上小横为 90% 的分布值,上小叉为 95% 的分布值。

图 2 香洲、前山和吉大  $PM_{10}$  日均值的月变化图

Fig.2 The monthly variations of daily  $PM_{10}$  concentrations at Xiangzhou, Qianshan and Jida stations

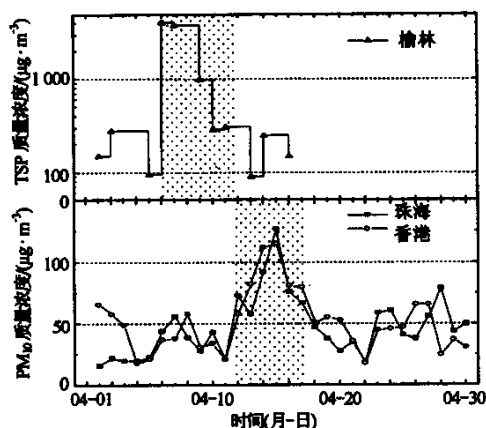


图 3 2001 年 4 月珠海的  $PM_{10}$  质量浓度与香港  $PM_{10}$  以及榆林 TSP 浓度的对比

Fig.3 The comparison of  $PM_{10}$  concentrations at Zhuhai, Hong Kong and TSP at Yulin during April 2001  
万方数据

15 日珠海( $PM_{10}$  峰值)的低层大气源自我国西北地区(气团轨迹图略)。因此 4 月 14—15 日珠海  $PM_{10}$  质量浓度的大幅增高可能主要是受北方沙尘暴的影响,即矿物粉尘长距离输送至珠海而导致珠海空气中  $PM_{10}$  质量浓度升高。

前山点的  $PM_{10}$  季节浓度也类似于香洲点,即夏、秋季  $PM_{10}$  质量浓度低,冬春季  $PM_{10}$  质量浓度高,但其变化幅度不如香洲点高,这可能是由于该点受附近工业源排放的影响。工业源为常年排放源,不受季节变化影响,故前山点中  $PM_{10}$  质量浓度季节变化相对较小。吉大点的  $PM_{10}$  季节变化呈现出夏季低、秋春季高的趋势。

### 2.3 不同季节 $PM_{10}$ 的日均小时质量浓度变化

图 4 给出了夏、秋、冬和春四季 3 个站点  $PM_{10}$  的日均小时质量浓度变化状况。

由图 4 可以看出,不同季节  $PM_{10}$  的小时变化是不

一致的。图 4(a) 是夏季 3 个点的 PM<sub>10</sub> 小时质量浓度变化图。其中吉大点的 PM<sub>10</sub> 变化趋势类似, 即早晚 (0—6:00, 18:00—24:00) 低, 白天 (6:00—18:00) 高, 这主要是由于类似机动车、易散性粉尘等颗粒物源在白天释放的颗粒物相对较多的缘故, 此外夏季白天的日照充足, 机动车源释放的 NO<sub>x</sub> 和天然植被释放的 VOC (挥发性有机物) 较多, 容易经光化学反应形成颗粒物, 导致 PM<sub>10</sub> 质量浓度偏高。前山点 PM<sub>10</sub> 的质量浓度变化也是白天高、早晚低, 但是在 8:00 和 19:00 左右质量浓度出现 2 个峰值, 这可能主要与前山站点附近有众多的工厂有关, 早晚的 2 个峰值指示早晚上下班的 2 个高峰时期, 此时人、车流量大, 造成 PM<sub>10</sub> 质量浓度偏高。香洲点的 PM<sub>10</sub> 日均小时质量浓度变化不大, 在 8:00 和 19:00 出现 2 个不太明显的高值, 表明该站点附近无显著的人为排放源, 其浓度变化可能主要受城市的背景浓度变化控制。此外, 对比 3 个站点的 PM<sub>10</sub> 质量浓度, 前山点的 PM<sub>10</sub> 明显高于另外 2 个站点, 这主要是由于工业源排放较多的颗粒物, 导致其质量浓度较高。

图 4(b) 是秋季的 PM<sub>10</sub> 日变化状况, 可以看出在 9:00, 13:00 和 18:00 左右出现高值, 这对应于居民活动的 3 个高峰期, 表明该点的 PM<sub>10</sub> 主要是受居民活动

的影响。3 个点的 PM<sub>10</sub> 变化类似于夏季的 PM<sub>10</sub> 变化, 也是白天高、晚上低。这也与前面的月平均质量浓度变化相一致, 即夏、秋季的影响因素相似, 导致 PM<sub>10</sub> 的日变化类似。

图 4(c) 是冬季的 PM<sub>10</sub> 日变化状况。香洲和吉大点的 PM<sub>10</sub> 变化也是白天高、夜晚低, 但白天与夜晚的质量浓度相差较大, 且白天 PM<sub>10</sub> 的变化幅度较大, 这表明该点受到多种因素的复杂影响, 包括颗粒物排放源和气象因素的影响。前山 PM<sub>10</sub> 的变化形式完全不同于夏、秋季的 PM<sub>10</sub> 变化, 也不同于冬季其他 2 个站点 PM<sub>10</sub> 变化, 它呈现出早晚高、白天低的模式, 并且变化幅度较大, 早晚与白天的峰值差异超过 20 μg/m<sup>3</sup>。出现这种形式的原因是否与该点附近的工业源的不规则排放有关 (如白天工厂的颗粒物除尘效率高、晚上可能在无除尘控制条件下排放烟尘), 还需要进一步讨论。

图 4(d) 是春季的 PM<sub>10</sub> 日变化状况。春季香洲和吉大点的 PM<sub>10</sub> 变化也是白天高、夜晚低。但它们 PM<sub>10</sub> 略高于前山的 PM<sub>10</sub> 值, 这可能主要与春季城外颗粒物输送至这 2 个站点有关。前山 PM<sub>10</sub> 的变化与前面的变化形式都不同, 是由 0:00 开始至 12:00 呈逐渐下降趋势, 12:00—24:00 则变化平缓。

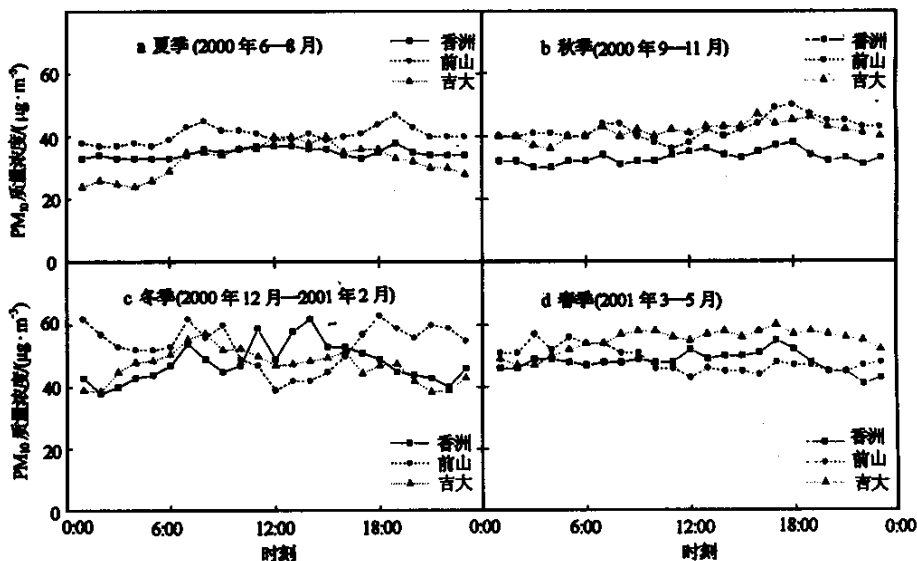


图 4 2000 年 6 月—2001 年 5 月香洲、前山和吉大站点的 PM<sub>10</sub> 的小时变化图

Fig.4 Hourly variations of PM<sub>10</sub> at Xiangzhou, Qianshan and Jida stations from June 2000 to May 2001

### 3 结论

通过对珠海香洲、前山和吉大 3 个站点 2000 年 6 月—2001 年 5 月 PM<sub>10</sub> 小时质量浓度的统计分析表明:

a. 3 个点的 PM<sub>10</sub> 年均质量浓度为 39, 44, 36 μg/m<sup>3</sup>, 平均为 40 μg/m<sup>3</sup>, 校正后为 52 μg/m<sup>3</sup>, 低于国家 PM<sub>10</sub> 的二级质量标准。相比而言, 珠海 PM<sub>10</sub> 低于武汉、

兰州和重庆 ,与国外一些空气质量好的城市( 洛杉矶、巴黎和米兰 )相近。

b. 香洲点 4 月 14 和 15 日的  $PM_{10}$  日均值分别为  $92,127\mu g/m^3$  ,对比香港的  $PM_{10}$  以及北方粉尘源区榆林站点的 TSP 质量浓度及气团轨迹分析结果可知 ,珠海的大气颗粒物在春季受到了北方沙尘暴的影响。

c. 3 个点  $PM_{10}$  月平均质量浓度变化一致 ,即夏秋季( 6—11 月 ) $PM_{10}$  低 ,冬春季高。

d.  $PM_{10}$  日变化以白天高、夜晚低为主 ,但不同季节的变化不完全一致。香洲点夏、秋季小时质量浓度变化不大 ,但在冬季的白天出现明显的峰值 ,与夜晚的  $PM_{10}$  质量浓度差别显著。前山点夏、秋季小时质量浓度主要在 9 :00 和 18 :00 左右出现峰值 ,对应于城市居民活动的 2 个高峰期 ,但其冬、春季的变化形式则明显不同 ,这主要与附近的工业颗粒物排放源有关。吉大点  $PM_{10}$  四季的小时质量浓度主要在 9 :00 和 13 :00 左右出现高值 ,表明了人为活动的影响。

致谢 :中国气象科学研究院郑向东博士提供气团轨迹分析的结果。

## 参考文献：

[ 1 ] David Muir. New directions :The suitability of tapered element oscillating microbalances( TEOMs ) for  $PM_{10}$  monitoring in Europe :The use of  $PM_{10}$  data as measured by TEOM for compliance with the European Air Quality Standard[ J ]. Atmos Environ ,2000 ,34 :3209 – 3211 .  
[ 2 ] Ayers G P ,Keywood M D ,Gras J L. TEOM vs manual gravimetric methods for determination of  $PM_{2.5}$  aerosol mass concentrations[ J ]. Atmos Environ ,1999 ,33 :3717 – 3721 .

[ 3 ] King A M. New directions :TEOMs and the volatility of UK non-urban  $PM_{10}$  :a regulatory dilemma ?[ J ]. Atmos Environ ,2000 ,34 :3210 – 3212 .  
[ 4 ] Wei F ,Teng E ,Wu G ,et al. Ambient concentrations and elemental compositions of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in four Chinese cities[ J ]. Environ Sci Technol ,1999 ,33 :4188 – 4193 .  
[ 5 ] Blanchard C L ,Carr E L ,Collins J F ,et al. Spatial representativeness and scales of transport during the 1995 integrated monitoring study in California's San Joaquin Valley[ J ]. Atmos Environ ,1999 ,33 :4775 – 4786 .  
[ 6 ] Ruellan S ,Cachier H. Characterisation of fresh particulate vehicular exhausts near a Paris high flow road[ J ]. Atmos Environ ,2001 ,35 :453 – 468 .  
[ 7 ] Marcazzan G M ,Vaccaro S ,Valli G ,et al. Characterisation of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  particulate matter in the ambient air of Milan ( Italy ) [ J ]. Atmos Environ ,2001 ,35 :4639 – 4650 .  
[ 8 ] Harrison R M ,Deacon A R ,Jones M R. Sources and processes affecting concentrations of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  particulate matter in Brimingham ,UK [ J ]. Atmos Environ ,1997 ,31 :4103 – 4117 .  
[ 9 ] Pellizzari E D ,Clayton C A ,Rodes C E ,et al. Particulate matter and manganese exposure in Toronto ,Canada[ J ]. Atmos Environ ,1999 ,33 :721 – 734 .  
[ 10 ] Zhang X Y ,Gong S L ,Richard Arimoto ,et al. Characterization and temporal variation of Asian dust aerosol from a site in the northern Chinese desert[ J ]. J Atmos Chem ,2003 ,44 :241 – 257 .  
[ 11 ] Fang M ,Zheng M ,Wang F ,et al. The long-range transport of aerosols from northern China to Hong Kong-a multi-technique study[ J ]. Atmos Environ ,1999 ,33 :1803 – 1817 .  
[ 12 ] Cao J J ,Lee S C ,Zheng X D ,et al. Characteristics of Hong Kong aerosols during the dust storm in April 1998[ J ]. Water Air Soil Pollut ,2003 , ( 3 ) 213 – 229

( 上接第 5 页 )

[ 6 ] 陆钟武. 论钢铁工业的废钢资源[ J ]. 钢铁 ,2002 ,37( 4 ) :66 – 70 .  
[ 7 ] 陆钟武. 钢铁产品生命周期的铁流分析——关于铁排放量源头指标等问题的基础研究[ J ]. 金属学报 ,2002 ,38( 1 ) :58 – 68 .  
[ 8 ] Côté R P. Exploring the analogy further[ J ]. J Industrial Ecology ,1999 ,3 ( 2/3 ) :11 – 12 .

[ 9 ] 陆钟武 ,蔡九菊 ,于庆波 ,等. 钢铁生产流程的物流对能耗的影响[ J ]. 金属学报 ,2000 ( 4 ) :370 – 378 .  
[ 10 ] 刘丽儒 ,陆钟武 ,于庆波 ,等. 烧结法氧化铝生产流程中物流对能耗的影响[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版 ) ,2002 ,23( 10 ) :944 – 947 .