

北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO_2 的垂直分布分析

孙扬¹, 王跃思¹, 刘广仁¹, 安俊琳², 马志强¹, 石立庆¹, 徐宏辉¹

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 南京信息工程大学应用气象学系, 南京 210044)

摘要: 在 2004-09-27~2004-10-12 期间, 以 325m 气象与环境观测塔为平台, 使用 43CTL 型高精度脉冲荧光 SO_2 分析仪, 分别布置在观测塔 8m、47m、120m 和 280m 4 层观测平台, 对大气中的 SO_2 气体浓度、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子质量浓度及同步气象因素进行了垂直梯度连续观测. 结合气象数据分析了观测期间大气中 SO_2 气体浓度的垂直梯度分布及变化形势, 进行了 SO_2 浓度与混合层高度变化、海平面气压变化、风速、风向变化等要素的相关分析, 观测到在实验期间大气边界层中 SO_2 浓度由上向下递减分布的现象. 由于地形与污染源分布的影响, 北风最有利于污染扩散等状况. 观测期间捕捉到一次主要由气象因素造成的大气环境严重持续污染及污染清除的全过程.

关键词: SO_2 ; 垂直分布; 大气环境污染

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)03-0408-07

Analysis for Vertical Profile of Atmospheric SO_2 During Air Seriously Polluted Days in Beijing

SUN Yang¹, WANG Yue-si¹, LIU Guang-ren¹, AN Jun-lin², MA Zhi-qiang¹, SHI Li-qing¹, XU Hong-hui¹

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Department of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The concentration of SO_2 was observed continuously from Sep 27, 2004 to Oct 12, 2004 in Beijing. We used the trace level pulsed fluorescence SO_2 analyzers to measure this pollutant in air. The four SO_2 analyzers were placed in four different levels (8m, 47m, 120m and 280m) of the 325m tall meteorologic observation tower. According to the meteorology data and the concentration of SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ that observed from the tower, the vertical profile and the consistence trend of atmospheric SO_2 were analyzed, and also found out the dependence relation between the consistence trend and the meteorological factors such as mix level altitude, air pressure, wind speed, and wind direction. Some air highly polluted days which caused by the meteorology was observed.

Key words: SO_2 ; vertical profile; air seriously polluted

大气中的 SO_2 气体对人体与动植物都具有显著的危害^[1], 它是酸雨和硫酸烟雾型污染的主要前体物^[2], 同时 SO_2 在大气中氧化形成硫酸盐气溶胶是城市大气细颗粒的重要组成部分^[3], 并且它的反应性还会影响大气中另一种主要污染物氮氧化物的浓度^[4], 它是影响北京市环境质量, 造成区域大气复合型污染的重要因素^[5], 而大气污染物浓度分布除了与污染源的分布和源强大小有直接关系外, 还与气象条件, 如风向、风速、降水、温度、辐射、大气层结稳定性和混合层高度等有密切的关系^[6]. 观测大气污染物浓度变化的同时, 同步观测、分析气象因素与污染物浓度的关系不仅能合理解释实验数据, 而且还可研究观测区域大气污染形成的外部条件, 对空气质量预测、预报和调控大气污染研究具有重要基础性意义^[7]. 为进一步研究城市边界层中大气污染物扩散规律和光化反应机制以及开展微尺度边界

层大气污染物数值模拟研究, 需要对典型城市边界层中大气污染物的垂直剖面特征及变化规律进行观测研究^[8].

于 2004-09-28~2004-10-12, 在中国科学院大气物理研究所的 325m 气象与大气环境观测塔上进行了针对 SO_2 的垂直梯度观测. 观测期间, 北京出现了少有的雾、烟霾、烟尘天气, 而在烟雾时空气中有毒、有害物质和大气污染物会发生一系列物理化学反应, 从而产生新物质, SO_2 在大气中被氧化后, 与雾滴结合成硫酸气溶胶, 这种二次污染物的毒性要比原来的物质提高 10 倍以上^[9], 在该时期进行实验, 对了解此过程具有一定意义.

收稿日期: 2005-01-24; 修订日期: 2005-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40222202)

作者简介: 孙扬(1974~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为大气化学, 大气环境, E-mail: suny@mail.iap.ac.cn

1 材料与方法

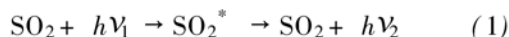
1.1 样品采集

中国科学院大气物理研究所高 325m 的气象观测塔位于北京市北三环路和北四环路之间,距三环路约 1km,其东面 200m 处为南北走向的八达岭高速公路,北边 50m 处为东西走向的北土城西路. 2004-09-27 至 2004-10-12 在该观测塔 4 个不同高度 (280、120、47 和 8m) 分别设置美国热电环境设备公司出产的 43CTL 高精度脉冲荧光 SO_2 分析仪对该地区 SO_2 浓度进行了高频 (平均时间 30s) 连续观测,同时在 8m 平台设置了 2 台美国安普 rp1400a 型环境颗粒物监测仪在线测量大气中 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子的质量浓度,并同步观测各层气象参数.

1.2 仪器设备

1.2.1 SO_2 观测设备

采用美国热电环境设备公司出产的 43CTL 高精度脉冲荧光 SO_2 分析仪进行梯度观测,该型仪器是基于 SO_2 分子吸收紫外线,并能被一定波长的紫外线激发,当被激发的 SO_2 分子返回到基态时释放出另一波长的紫外光,光的强度与 SO_2 的浓度呈线性正相关,检测其光强即可对 SO_2 定量测定,其化学反应式如式(1):



该型仪器最低检测限 (体积分数) 0.06×10^{-9} , 零漂小于 0.2×10^{-9} (24h), 跨漂 $\pm 1\%/7\text{d}$. 观测前后对 4 层仪器进行了统一标定,以减少仪器造成的系统误差.

1.2.2 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 观测设备

使用美国安普 rp1400a 环境颗粒物监测仪在线测量大气中 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子的质量浓度. 仪器参数,数据频率: 2s 更新 1 次数据;精度: $\pm 1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ (h 平均质量浓度), $\pm 0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h 平均质量浓度);分辨率: $0.01\mu\text{g}/\text{m}^3$;采样头: PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 或 TSP;输出数据: 30min, 1h, 8h, 24h 平均.

1.2.3 气象因素观测设备

近地面资料采用 8m 高度的自动气象塔资料,该自动站采用芬兰 Vaisala 公司出产的 Milos520,可观测大气压、温度、湿度、露点、风速和风向. 其技术参数为:温度: 量程 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 精度 0.2°C ;湿度: 量程 $0 \sim 100$, 精度 2% ;风向: 量程 $1^\circ \sim 360^\circ$, 精度 5° ;风速: 量程 $0 \sim 75 \text{ m/s}$, 精度 0.4 m/s ;气压: 精度 0.2 hPa ; 47m、120m、280m 温度、风速、风向采用气象塔同步资料,气象塔气象观测仪器详情见参考

文献[10]. 2 套气象设备均符合世界气象组织 (WMO) 规范.

2 结果与讨论

2.1 SO_2 梯度观测数据

观测有效数据共 15d, 为便于和气象数据比较, 本文使用 1h 平均值. 从表 1 (描述统计分析表) 中可看出, 随高度的增加, SO_2 的平均浓度随之增加, 小时平均浓度最大值与所有观测数据最大值 (体积分数) 分别为 83.5×10^{-9} 和 23.1×10^{-9} 均出现在 280m 处, 而 8m 处观测期间小时平均最大值 (体积分数) 仅为 43.4×10^{-9} , 全体平均浓度为 18.4×10^{-9} . 浓度变化幅度是观测点越高, 变化范围越大, 280m 处数据的方差达到 279.9, 最大值与最小值全部出现在该层, 最低的 8m 处变化范围最小, 数据方差为 73.6, 因此可知在城市边界层内的大气 SO_2 浓度垂直分布是非均一的, 280m 内, 在污染过程中平均浓度值与变化率都随高度增加而增加.

表 1 SO_2 浓度描述统计分析 (体积分数) $\times 10^{-9}$

Table 1 SO_2 Descriptive statistics (V/V) $\times 10^{-9}$

参数	8m	47m	120m	280m
全体平均	18.4	21.5	22.3	23.1
中位数	19.4	23.5	23.0	22.8
标准差	8.6	11.4	12.6	16.7
方差	73.6	129.3	158.1	279.9
最小值	3.8	0.8	1.2	0.1
最大值	43.4	53.9	61.2	83.5

纵观整个实验期, 如图 1 所示. 大气 SO_2 浓度与气象条件紧密相关. 据北京市环保局发布的空气质量公报, 9 月上旬, 北京上空冷空气活动频繁、降水较多, 有利于空气中污染物的扩散, 使得市内污染物很低, 空气质量持续良好. 而 09-22 以后, 市区基本受弱低气压场控制, 大气层结稳定, 空气湿度大, 气象条件不利于污染物扩散, 使得环境容量减少, 空气自净能力降低, 空气质量连续 7d 超标^[11]. 本实验中 SO_2 浓度观测正是开始与此污染过程后期, 4 层 1h 平均最高浓度 (体积分数) 也分别达到了 8m 处 29.23×10^{-9} 、47m 处 35.23×10^{-9} 、120m 处 38.58×10^{-9} 、280m 处 40.11×10^{-9} . 29 日一股冷空气由西北移动到华北, 30 日夜开始, 北京刮起强劲的北风, 10-01 白天地面风速最大达到 7 m/s , 直到 10-02 北风逐渐转小. 期间, SO_2 浓度 4 层 1h 平均最低浓度分别降至观测期的最低点 8m 处 3.84×10^{-9} 、47m 处 0.84×10^{-9} 、120m 处 1.20×10^{-9} 、280m 处

0.13×10^{-9} 。10-03~10-04 晴间多云, 风力不大, 气温回升, SO_2 浓度缓慢上升。10-04 开始, 北京地区上空逐渐处于强暖区控制, 地面风速很低, 持续出现大气层结稳定、强逆温天气, 到 10 日为止, 北京连续 4d 出现大雾天气, 近地层的大气十分浑浊, 早晨和夜间雾气加重, 白天处于阴霾天气, 日平均气温维持在 17°C 左右, 白天的最高气温在 $24\sim 26^\circ\text{C}$ 之间, 夜间最低气温降至 $12\sim 13^\circ\text{C}$, 这种气象条件非常不利于污染物扩散^[12], 各层平台大气 SO_2 浓度亦逐步上

升, 4 层 1h 平均最高浓度 (体积分数) 分别达到了 8m 处 43.44×10^{-9} 、47m 处 53.89×10^{-9} 、120m 处 61.24×10^{-9} 、280m 处 74.60×10^{-9} , 5min 平均最高浓度分别达到了 8m 处 49.05×10^{-9} 、47m 处 79.10×10^{-9} 、120m 处 159.40×10^{-9} 、280m 处 160.60×10^{-9} 。10 日晚间至 11 日凌晨, 来自内蒙古东部的冷空气前锋移动至华北, 北京地区开始 $3\sim 4\text{m/s}$ 的偏北风, 11 日下午北风达到 6 m/s , 空气质量再度明显改善, SO_2 浓度大大降低。

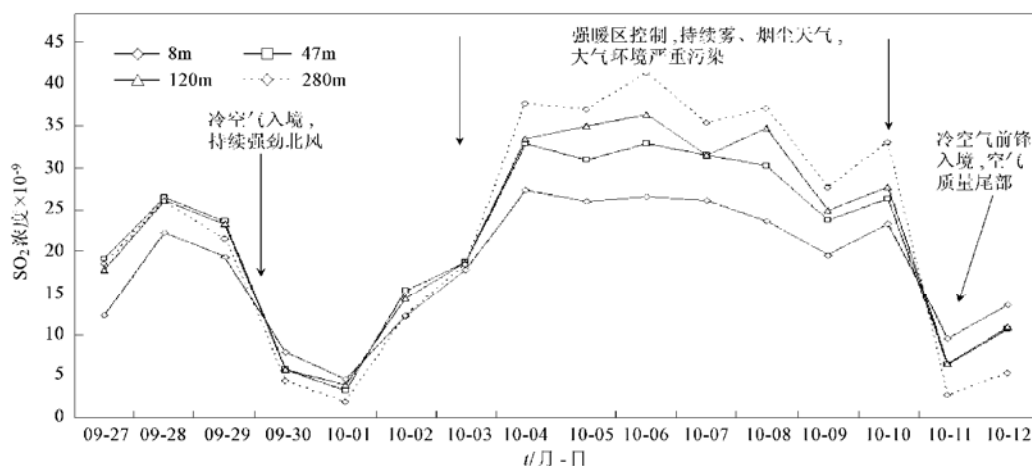


图 1 观测期 SO_2 浓度逐日平均变化

Fig. 1 Time serial of SO_2 in experiment

综合北京市环保局发布的空气质量公报与本观测结果, 将观测期内近 16d 的数据分为 2 类, ①是 10-04~10-10 日共 6d 为污染期, ② 09-30~10-03, 及 10-11, 非污染期。对这 2 类数据进行日变化分析 (见图 2), 在非污染期, SO_2 的垂直分布基本上为底层浓度高, 高层浓度低, 对天气形势分析后认为是由于强冷空气过境带来的较清洁气团取代本地气团, 而低层下垫面复杂, 不易快速清除所致, 非污染期早晚各有一个峰值, 分别在 06:00~08:00 和 23:00~12:00, 是由于这期间风速减弱所致; 在污染期, SO_2 的垂直分布基本上是高层浓度高, 底层浓度低, 考虑这期间大气层结非常稳定, 和强逆温的存在, 认为这种状况是由于非采暖期 SO_2 污染源主要是工业排放的高架源, 以及污染物由上向下输送的特征造成的, 而其白天浓度低, 夜间浓度高的状况符合大气混合层变化特点。

2.2 与北京市环境保护局公布数据比对

为了比对实验结果、分析实验数据, 记录了实验期间北京市环保局发布的北京市空气质量 API 指数, 并按国家环境监测总站办字[2000]026 号文件

规定的标准进行了 API 指数到浓度的反算, 见表 2。

北京市环保局各观测站位于近地层, 本文也选取相应 8m 处数据进行比对, 除北京市环保局未公布 $\text{PM}_{2.5}$ 数据无法比较外, 将实验所得 8m 处 SO_2 、 PM_{10} 数据计算日平均浓度。 SO_2 共 16 个日平均数据, PM_{10} 观测较晚, 有效数据从 09-30 开始, 共 13 个日平均数据。由相关分析表 (表 3) 数据和图 3 来看, 本次观测与北京市环保局所观测数据基本趋势一致, 在浓度绝对值上有些差别, 这些差别来源于测站位置的不同, 以及所使用观测仪器的不完全相同所造成的。就观测项目来看, 本实验所测 SO_2 浓度普遍高于北京市环保局公布的数据, 可能原因为, 本实验为单点观测, 观测点有可能处在观测期间 SO_2 浓度较高的区域, 而环保局为多个测站的平均值, 有其它浓度较低区域使平均值较低; 而 PM_{10} 的 2 套数据符合得相当好, 这表明北京地区可吸入颗粒物的浓度分布可能比较均匀。城市大气中颗粒物的来源众多而且成分复杂、分布较广^[13], 而大气中 SO_2 气体在北京主要来源于煤炭、石油燃料燃烧, 在非采暖期与城市居民炊事普遍气化的情况下, 其污染源相对

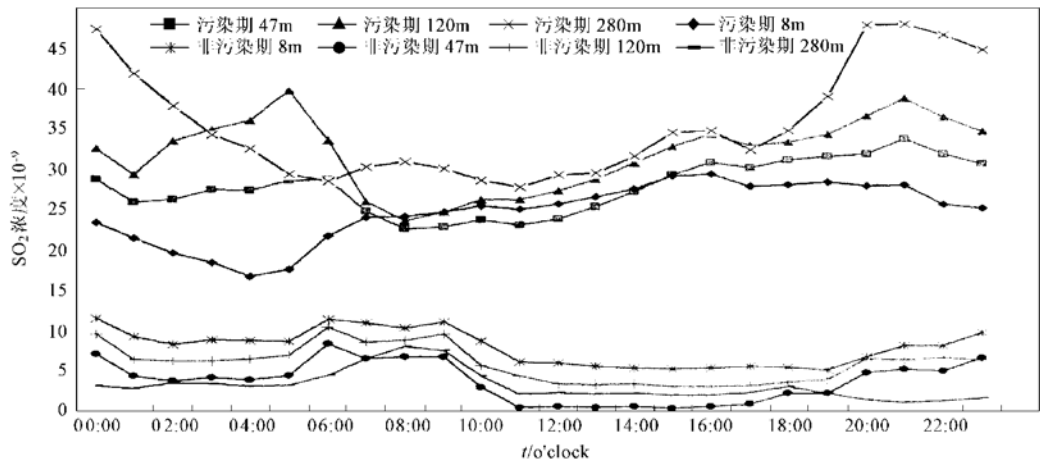


图 2 污染期与非污染期 SO₂ 浓度日变化比较

Fig. 2 Compare of SO₂ concentration between air polluted days and clean days

表 2 根据 API 指数反算可吸入颗粒物和 SO₂ 的浓度

Table 2 Calculated concentration and API index

时间/年-月-日	空气质量状况	可吸入颗粒物 (PM ₁₀) API 指数	SO ₂ API 指数	首要污染物	PM ₁₀ 浓度/μg·m ⁻³	SO ₂ 浓度(体积分数) × 10 ⁻⁹
2004-09-27	轻微污染	114	31	PM ₁₀	178	11.8
2004-09-28	良	100	34	PM ₁₀	150	13.0
2004-09-29	轻微污染	134	34	PM ₁₀	218	13.0
2004-09-30	轻微污染	141	17	PM ₁₀	232	6.5
2004-10-01	优	16	7	NO ₂	16	2.7
2004-10-02	良	59	18	PM ₁₀	68	6.9
2004-10-03	良	84	26	PM ₁₀	118	9.9
2004-10-04	轻微污染	118	32	PM ₁₀	186	12.2
2004-10-05	轻度污染	154	46	PM ₁₀	258	17.6
2004-10-06	轻度污染	166	43	PM ₁₀	282	16.4
2004-10-07	严重污染	326	38	PM ₁₀	441	14.5
2004-10-08	严重污染	402	30	PM ₁₀	502	11.5
2004-10-09	中度重污染	264	35	PM ₁₀	395	13.4
2004-10-10	严重污染	375	24	PM ₁₀	480	9.2
2004-10-11	轻微污染	128	24	PM ₁₀	206	9.2
2004-10-12	优	38	16	PM ₁₀	38	6.1

单一、固定是其浓度分布不均的主要原因;而另一方面 SO₂ 在大气中的寿命仅为几小时到几天^[13], PM₁₀在无湿清除的情况下,寿命在 12d 以上^[14],因此在北京这样的大型城市里 SO₂ 浓度会比 PM₁₀ 的浓度有更大的地区差异.

表 3 8m 高度 SO₂、PM₁₀浓度与北京市环保局数据相关分析

Table 3 Correlation analysis of 8 m data with the Beijing Environment Protect Bureau

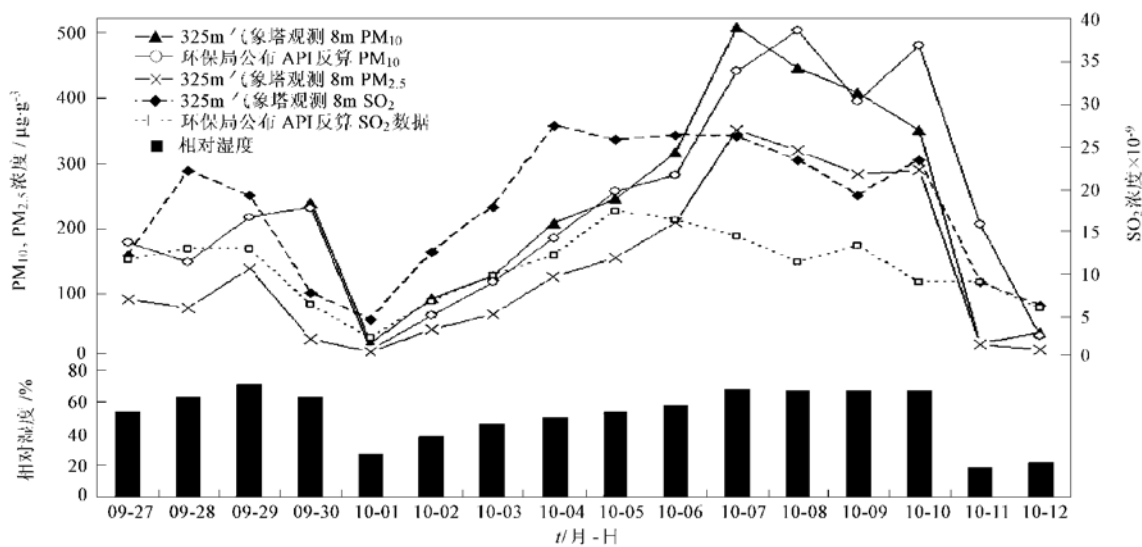
项目	8m SO ₂ 与北京市 环保局 SO ₂	8m PM ₁₀ 与北京 市环保局 PM ₁₀
相关系数	0.829	0.913
p 值(双侧) ¹⁾	< 0.001	< 0.001
样本数	16	13

1) p < 0.01 相关显著

直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物即 PM_{2.5}是由直接排入空气中的一次微粒和空气中的气态污染物通过化学转化生成的二次微粒所组成. 北京地区一次微粒主要由尘土性微粒、植物和矿物燃料燃烧产生的炭黑粒子组成,二次微粒主要由硫酸铵和硝酸铵组成,这 2 种微粒是由大气中的 SO₂ 和 NO_x 与 NH₃ 反应生成的水溶性化合物,在低空湿度大时容易生成 PM_{2.5}. 由图 3 中也可看出,随着 10-02 后湿度的稳定增加,SO₂、PM₁₀不断积累,PM_{2.5}也不断生成和积累,直到 10-07~ 10-10 达到最大,形成了北京地区连续 4d 的大气环境严重污染状况.

2.3 海平面气压、温度与各层 SO₂ 浓度的关系

地面天气形势是高低空大气扩散能力和稳定程

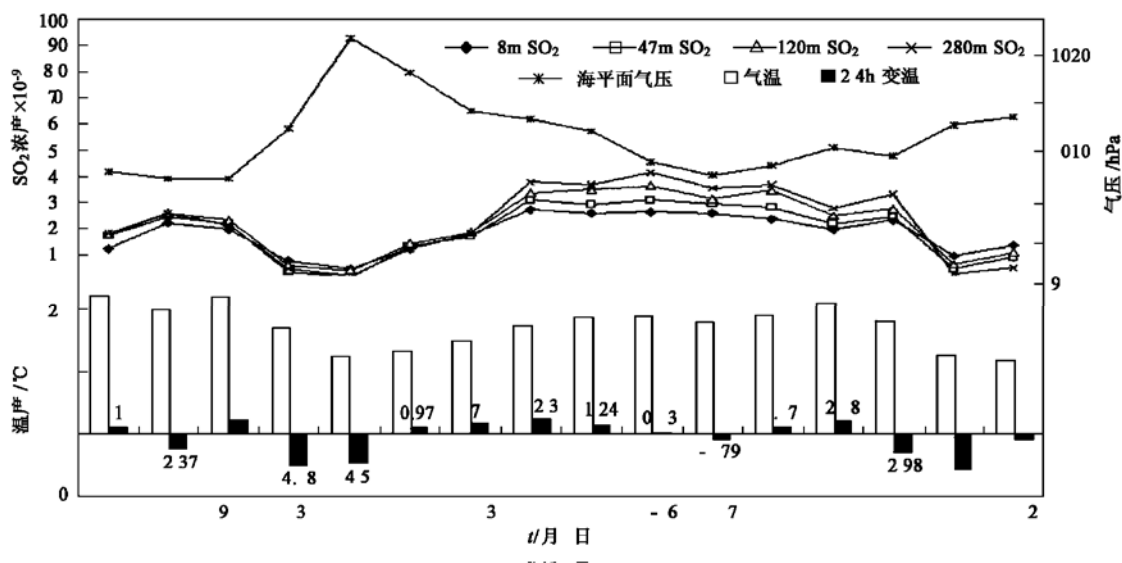
图3 与北京市环境保护局 SO_2 、 PM_{10} 浓度对比及与相对湿度变化关系Fig. 3 Compare on observed concentration of SO_2 and PM_{10} with the Beijing Environment Protect Bureau's data and RH variety

度的综合反映,对地面气压的分析,有利于了解大气污染形成的外部条件,以往其他学者研究表明,在北京地区冷高压、高压前部以及高压回流等地面天气形势有利于污染物的扩散,而弱高压、均压和低压不利于污染物的扩散,往往造成大气 SO_2 的污染^[7]。

观测期为非采暖期,北京地区 SO_2 排放源主要来自工业排放和周边输送,因此可认为其排放量变化不大。将海平面气压日平均值、气温日平均值和4层 SO_2 浓度日平均值结合分析(图4),在实验期间,观测到 09-30~10-03 期间出现极利于扩散的冷高压、大风过境,其间,气温降低,24h 变温近 -5°C ,各

层 SO_2 浓度均达到最低点;其后经历了 10-04~10-10 期间地面气压场减弱,地面风速较小,多次出现静风与准静止风,伴随强低空逆温,大气层结很稳定的地面天气形势,在暖低压控制期间,24h 变温基本为正,最高 2.31°C ,这使得地面辐合较强,污染物不但不易扩散,还造成北京周边地区大气污染物向中心聚集,加重北京市区大气污染程度,同时,4 层的 SO_2 浓度的随高度增高而增高的梯度分布形势也是大气向中心辐合的体现,图4表现出这种典型的大气环境质量与地面天气形势的对应关系。

2.4 风向、风速与各层 SO_2 浓度的关系

图4 海平面气压与各层 SO_2 浓度的关系Fig. 4 Contrast of SO_2 consistence and air pressure

风速和风向对 SO_2 在大气中的扩散有至关重要的作用. 本文将 4 层相应观测高度的风速、风向资料与 SO_2 的浓度数据结合在一起分析. 8m 处风向以西风、西南风和东风为主, 东北风平均风速最强, SO_2 浓度在东北风、北风时浓度较低; 47m 处西北风, 北风也较少, 风速较低, 东风和东北风频率较高, 风速较强, SO_2 浓度也较低; 120m 处风速、风向以东北风和西南风为主导, 而 SO_2 浓度在东北风时最低. 280m 处以东南风, 东北风和北风为主导, SO_2 在盛行北风和东北风时浓度最低; 4 层中 SO_2 浓度不但与风速相关还与风向紧密相关, 直观上盛行偏北、偏东方向风时, 风速较强, SO_2 浓度降低, 而偏南方向风速较弱, SO_2 浓度较高.

进一步分析浓度与风速、风向的相关关系, 使用北京市气象局发布的 3h 北京天气实况中的平均风场资料, 该平均风场代表北京地区的平均状况, 用它结合 SO_2 浓度数据进行分析, 可了解较大区域平均风场对 SO_2 浓度的影响. 由于风速与风向对 SO_2 浓度变化均有影响, 风速越大, 越有利于扩散, 这是显而易见的, 但风向与污染物浓度的变化却不好直接相比. 本文使用偏相关分析法, 控制风速的影响, 来分析风向与 SO_2 浓度的关系, 得出以下偏相关关系 (表 4).

表 4 SO_2 浓度与风速和风向偏相关分析¹⁾

Table 4 Results of partial correlation analysis between SO_2 and wind speed, wind

风向	8m	47m	120m	280m
北风	-0.4013 $p=0.000$	-0.4921 $p=0.000$	-0.4391 $p=0.000$	-0.3681 $p=0.000$
东北风	-0.0598 $p=0.518$	0.011 $p=0.906$	-0.0175 $p=0.850$	-0.0076 $p=0.935$
东风	-0.0061 $p=0.948$	0.0197 $p=0.832$	-0.0058 $p=0.950$	-0.0041 $p=0.964$
东南风	0.0699 $p=0.450$	0.0328 $p=0.723$	0.0065 $p=0.944$	0.0235 $p=0.800$
南风	0.1412 $p=0.126$	0.0846 $p=0.360$	0.0736 $p=0.426$	0.0448 $p=0.628$
西北风	-0.0319 $p=0.731$	-0.0987 $p=0.285$	-0.1133 $p=0.220$	-0.163 $p=0.077$
西风	0.0719 $p=0.437$	0.0532 $p=0.566$	0.0249 $p=0.788$	0.0354 $p=0.702$
西南风	0.2875 $p=0.002$	0.2803 $p=0.002$	0.2911 $p=0.001$	0.2481 $p=0.007$
南风, 西南风, 西风	0.3544 $p=0.000$	0.3015 $p=0.001$	0.2877 $p=0.002$	0.2409 $p=0.008$

1) $p < 0.01$ 相关显著, 样本数 117

从表 4 中可以看出, SO_2 浓度与 3h 平均风向北

风呈较显著负相关, 即北风出现, 污染物浓度就降低, 而 3h 平均风向为南风, 西南风和西风时, SO_2 浓度与它们呈正相关, 即出现以上 3 种风时, 浓度会有升高, 这是由于北京的地形影响, 北京东、西、北三面环山, 仅南面是平原, 所以只有冷空气过境, 北风盛行时, 污染物向南面扩散, 空气质量才能转好. 如果是其他风向风速较低时, 首先遇到了大山的阻拦, 城区上空气团无法扩散, 却被挤压, 使污染物浓度升高, 其次, 对于 SO_2 , 北京西部、老城区与南部拥有较多污染排放源^[16], 当风来自这些方向时, 会将污染物带入城区, SO_2 浓度不下降, 甚至会升高.

2.5 混合层高度与各层 SO_2 浓度的关系

在边界层中, 风和湍流是影响大气扩散能力的主要动力因子, 大气稳定度则是影响大气扩散能力的主要热力因子, 混合层高度是风与大气稳定度的综合体现, 因此污染物在大气中扩散、稀释的速率, 输送的距离、范围都和混合层的高度密切相关. 混合层的高度有许多确立的方法^[17], 本文采用较为符合北京地区的罗氏法 II^[18], 公式如式 (2):

$$H = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^k \left[(6-P)_j (T - T_d)_j + \frac{0.169P_j(u_{zj} + 0.257)}{12f \ln \left| \frac{Z}{Z_0} \right|} \right] \times f(i, j) \quad (2)$$

($T - T_d$) 为露点差 ($^{\circ}\text{C}$); P 为帕斯奎尔稳定度级别的取值; u_z 为 z 高度处所观测的平均风速 (m/s); Z_0 为地面粗糙度 (市区取 $0.8 \sim 2.0\text{m}$); f 为地转参数 ($1/\text{s}$), $f = 2\Omega \sin \Phi$; Φ 为地理纬度; Ω 为地球自转角速度; $f(i, j)$ 为各种风速段、不同大气稳定度条件下出现的频率 (%). 利用 8m 平台自动气象站观测的露点差、帕斯奎尔稳定度级别取值、平均风速、地面粗糙度等气象数据计算出观测期的混合层高度.

大气的运动是多尺度、非线性的, 污染物在大气中的扩散、传输受这种非线性运动的主导, 其浓度的变化规律是由周期性和非周期性的影响因子共同造成的^[19], 本文采用适于大气湍流去噪的三阶 Daubechies 母函数一维正交小波变换^[20]对所观测的各层 SO_2 浓度数据和气象数据进行 3 次分解去噪, 以分析观测过程中 SO_2 浓度随混合层高度变化的主要规律.

原始数据较为混乱, 而经过小波降噪后, 其变化形势比较明显, 更容易分析和分辨, 将分解的低频部分重构后的混合层高度数据与 SO_2 浓度数据合并

表 5 小波降噪后各层 SO₂ 浓度与混合层高度的相关系数Table 5 Correlation of DeNoising data of SO₂ and mixing layer height using wavelet analysis

观测层	8	47	120	280
相关系数	- 0.549	- 0.709	- 0.698	- 0.614
<i>p</i> 值(双侧)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

1) $p < 0.01$ 相关显著 $n = 366$

分析,两者具有显著的反相关关系,见表 5。即混合层高度高,大气环境容量加大,利于污染物的扩散与转化,SO₂ 浓度低,反之混合层高度降低,大气环境容量减小,污染物堆积压缩,不易扩散,SO₂ 浓度升高。其中以 47m 处和 120m 处的相关性最强,可见这 2 个高度层在北京混合层变化中最具有代表性,而由于北京地区高大建筑较多,本观测点周围的建筑物属于新老建筑混合区,老建筑一般都在 8m 左右,而新建筑一般在 30~ 50m,是具有典型特征的城市区,其冠层高度远大于 8m,所以该层相关性较差。在污染期,混合层顶夜间常低于 280m,使该层处在自由大气状态,所测 SO₂ 浓度不再代表混合层内状况,是导致该层相关性低于 47m 与 120m 的主要原因。同时,在混合层降低的过程中,一部分 SO₂ 留存在混合层顶以上,并按自由大气风场扩散输送,是污染期 SO₂ 清除的主要途径之一。

3 结论

(1) 北京地区 SO₂ 浓度在高度 280m 内垂直分布不均一,在空气污染时,SO₂ 浓度与浓度变化幅度随着高度的增加而增高,同时 SO₂ 浓度在北京地区存在区域差异,而 PM₁₀ 分布相对均匀。

(2) 在污染源变化不大的情况下,天气形势主导着污染物的扩散、传输和清除,观测期间,北京地区大气 SO₂ 浓度随天气形势而变化,海平面气压与 SO₂ 浓度变化密切相关,伴随大风降温的高压控制下,大气辐散,空气扩散能力强,SO₂ 浓度极低,而伴随 24h 正变温的低压形势,大气辐合,不利于污染扩散,大气 SO₂ 浓度高。

(3) 由于北京东、西、北三面环山,仅南面是平原,西部、老城区与南部拥有较多污染排放源,SO₂ 浓度变化不仅与风速有关,还与风向有关,北风最有利于 SO₂ 浓度降低,其它风向在风力不强时(小于 3m/s)并不能降低污染,东南方向的工业排放和老城区面源排放是非采暖期北京大气 SO₂ 的主要源。

(4) 混合层高度是城市近地层污染扩散能力的

最集中、直观体现,SO₂ 浓度变化与混合层高度呈显著负相关,混合层高度升高 SO₂ 浓度降低,混合层高度降低 SO₂ 浓度升高。

致谢:对张文研究员,胡波、辛金元、宋涛等同学在塔上实验中给予的帮助和大气物理研究所 LAPC 325m 气象塔维护组成员在实验期间给予的技术支持,谨致诚挚谢意。

参考文献:

- [1] Eisinger M, Burrows J P. Tropospheric Sulfur Dioxide Observed by the ERS-2 GOME Instrument [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **22**: 4177~ 4180.
- [2] 王明星. 大气化学(第二版) [M]. 北京:气象出版社,1999. 51~ 54, 156~ 160.
- [3] 戴树桂,等. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社,1996. 88~ 89.
- [4] Bortoli D, Costa M J, Ravegnani F, *et al.* Atmospheric SO₂ vertical column retrieval from gome data analysis in the mediterranean area [A]. In: The 2001 EUMETSAT Meteorological Users' Conf. [C]. Turkey: Antalya, 2001.
- [5] 北京市环保局. 北京市环境状况公报[M]. 2000.
- [6] 李宗恺,潘云仙,孙澜桥. 空气污染气象学原理及应用[M]. 北京:气象出版社,1985. 557~ 569.
- [7] 孟燕军,程丛兰. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析[J]. *气象*, 2002, **4**(28): 42~ 46.
- [8] 孟昭阳,丁国安,于海青,等. 北京北部城区 SO₂ 和 NO₂ 浓度垂直分布特点初探[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**: 109~ 113.
- [9] 蔡宏道. 现代环境卫生学[M]. 北京:人民卫生出版社,1995.
- [10] 洪钟祥. 北京 325m 气象塔的测量系统[M]. 北京:科学出版社,1981.
- [11] 北京市环保局. 2004 年 9 月份空气质量月报[R]. 2004.
- [12] 北京市环保局. 2004 年 10 月份空气质量月报[R]. 2004.
- [13] Charlson R J, Langner J, Rodhe H, *et al.* Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulphate aerosols [J]. *Tellus*, 1991, **43A**: 152~ 163.
- [14] 秦瑜,赵春生. 大气化学基础[M]. 北京:气象出版社,2003. 76~ 77.
- [15] 郑志仁,王炳森,蒋学之,等. 环境病理学[M]. 山东:山东科学技术出版社,1991. 35~ 36.
- [16] 颜鹏,黄健, Roland Draxler. 周边地区对北京地面 SO₂ 影响的初步研究[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(s1): 144~ 152.
- [17] 程水源,席德立. 关于取定大气混合层高度的几种方法[J]. *环境科学进展*, 1997, **5**(4): 63~ 67.
- [18] 程水源,席德立,等. 大气混合层高度的确定与计算方法研究[J]. *中国环境科学*, 1997, **12**(6): 512~ 516.
- [19] 刘罡,李昕,胡非,等. 大气污染物浓度变化的非线性特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2001, **6**(3): 328~ 336.
- [20] 胡非. 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解[J]. *气候与环境研究*, 1998, **3**(2): 97~ 105.