

魏玉香,童尧青,银燕,等.南京 SO₂、NO₂和 PM₁₀变化特征及其与气象条件的关系[J].大气科学学报,2009,32(3):451-457.

南京 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 变化特征及其与气象条件的关系

魏玉香¹,童尧青²,银燕²,陈魁²

(1.南京市环境监测中心,江苏南京 210013;

2.南京信息工程大学 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室,江苏南京 210044)

摘要:利用南京市 2002—2006 年大气监测资料,分析了南京市大气中 SO₂、NO₂、PM₁₀ 年变化趋势及月季规律,评价了南京市空气质量状况。结果表明:5 a 来,SO₂ 质量浓度呈显著上升趋势,NO₂ 质量浓度缓慢上升,PM₁₀ 质量浓度明显下降;南京市首要污染物是 PM₁₀,SO₂、NO₂ 污染较轻;3 种污染物质量浓度均以夏季最低。进一步研究不同气象条件下污染物质量浓度发现,污染物质量浓度与风速反相关,且东南风时浓度最高;降水对污染物有清除作用;雾、霾天气下污染加剧;气象能见度与 PM₁₀、NO₂ 的质量浓度反相关;污染物有明显的“周末效应”,周末质量浓度值较低。

关键词:南京市;大气污染;SO₂;NO₂;PM₁₀;气象条件

中图分类号: P402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)03-0451-07

The Variety of Main Air Pollutants Concentration and Its Relationship with Meteorological Condition in Nanjing City

WEI Yu-xiang¹, TONG Yao-qing², YN Yan², CHEN Kui²

(1. Nanjing Environmental Monitoring Central Station, Nanjing 210013, China,

2. Key Laboratory for Atmospheric Physics & Environment of China Meteorological Administration, NU IST, Nanjing 210044, China)

Abstract: The annual tendency, monthly and seasonal distribution of main air pollutants SO₂, NO₂ and PM₁₀ and the quality of the atmosphere in Nanjing have been analyzed based on the atmospheric monitoring data from 2002 to 2006. The results show that, during the last five years, there have been a considerable increase in SO₂, a remarkable decrease in PM₁₀, and a slight increase in NO₂ mass concentrations. PM₁₀ was the dominant pollutants while the mass concentration of SO₂ and NO₂ were relatively low. All of the three pollutants presented minimum mass concentrations in summer. A comparison of the mass concentrations of the three pollutants under different meteorological conditions has revealed that a negative correlation existed between the concentrations of pollutants and wind speed and the maximum mass concentrations of pollutants were generally observed when the wind was blowing from the southeast. Precipitation had important cleanup effect on pollutants, while a worse situation occurred during haze or fog days. A negative correlation also existed between the visibility and the mass concentrations of PM₁₀ or NO₂. The air pollutants showed a “Weekend Effect” that their mass concentrations were obviously low during the weekends.

Key words: Nanjing; atmospheric pollution; SO₂; NO₂; PM₁₀; meteorological condition

0 引言

环境空气质量的优劣与人体健康密切相关。硫氧化物和氮氧化物具有腐蚀性和生理刺激作用,损

伤和危害呼吸系统,严重时则会导致呼吸衰竭^[1]。

PM₁₀也能够引起一系列严重的心血管及呼吸道疾病^[2]。同时 SO₂、NO₂ 为酸雨和光化学烟雾的主要前体物,是造成区域大气复合型污染的重要因

收稿日期:2008-03-24;改回日期:2008-06-14

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2006226);南京市环境保护局环保科技项目(200609)

作者简介:魏玉香(1971—),女,河南三门峡人,高级工程师,从事环境监测,weiyuxiang@126.com;银燕(通信作者),男,教授,博士生导师, yinyan@nuist.edu.cn

素^[3-4]。

长江三角洲地区是我国经济发展最快的地区之一。随着经济的发展,城市化、工业化发展迅猛,机动车拥有量、建筑工地扬尘量和工业耗煤量、工业废气排放量都在不断增加,使该地区的大气污染状况越来越严重,已经引起人们的广泛关注。王会祥等^[5]分析了长三角区域 6 个站点 1999 年 5 月—2000 年 10 月地表大气中痕量气态 NO 、 NO_x 、 SO_2 、 CO 和 O_3 的污染特征,发现 6 个观测点的 NO 、 NO_x 、 SO_2 、 CO 浓度的平均值远高于环境背景值,具有显著的季节变化,冬季最高,表明该区域已经被人为活动排放源污染。同时发现该区域全年臭氧浓度高值出现在 5—6 月,9 月也有臭氧高值事件。

李莉等^[6]以 TRACE-P 污染源资料及上海市地方排放清单为基础,采用 Models-3/CMAQ 环境空气质量模型和中尺度气象模式 MM5,模拟研究了 2001 年 1 月和 7 月长三角近地面二次污染物 O_3 及 PM_{10} 的浓度分布及输送状况,并以上海市监测数据对模型进行了验证。模拟结果显示,2001 年 7 月长三角区域 16 个主要城市中,有 14 个城市 O_3 小时最大浓度超过国家二级标准,高浓度 O_3 覆盖了苏南和浙北广大区域。

樊曙先等^[7]利用 2003—2004 年浙江临安区域大气本底站大气 N_x 和 SO_2 体积分数的连续观测资料,分析其季节变化和日变化特征。结果表明:长江三角洲区域本底大气中致酸气体 NO_x 、 SO_2 体积分数值均为冬季最高,分别为 3.81×10^{-9} 和 37.3×10^{-9} ,主要受来自东北方向宁、沪区域城市群的相对高浓度污染物随气团传输影响。他们的结果也显示,降水对 SO_2 去除作用明显,而对 NO_x 去除效果不大,区域 NO_2 和 SO_2 并未出现“周末效应”。

朱彬等^[8]应用大气光化学模式研究了日最大臭氧体积分数及其出现时刻与其前体物 NMHC、 NO_x 体积分数及 NMHC/ NO_x 比值的的关系。结果表明,影响日最大臭氧体积分数脊线位置的关键因子是 NMHC 成份组成比例,日臭氧体积分数达到最大值需要的时间与 NMHC/ NO_x 比值及 NMHC 成份组成比例有关,与 NMHC、 NO_x 体积分数关系不大。

余瑶等^[9]采用复杂地形三维中-尺度气象预报模式,模拟了上海地区的 SO_2 浓度分布。结果表明,上海的局地流场具有明显的日变化特征,受海陆温差的影响明显,日间风速较夜间风速大,风向呈顺时针旋转,在不稳定层结情况下,高架点源排放的高空污染物对地面的污染物浓度有贡献,会造成地面

污染物浓度升高。

本文以南京市 2002—2006 年大气监测资料为依据,统计分析南京市大气中 SO_2 、 NO_2 及 PM_{10} 污染变化规律,探讨气象因素对污染物质量浓度的影响,旨在更深入地了解 and 掌握南京市大气环境质量状况,从而为改善南京大气环境质量和污染防治等提供科学依据。

1 资料

2002—2006 年南京市环境监测站 6 个监测点(草场门、中华门、瑞金路、玄武湖、迈皋桥、山西路)的 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 日均质量浓度资料(取 6 站平均值代表南京市市区);2002—2006 年南京地面气象站霾、雾天气的气象记录;2006 年南京大校场逐日气象资料,包括风速、降雨量等。

2 南京市市区污染物的年、月变化及环境空气质量状况

2.1 污染物质量浓度的年际变化

SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 空气质量二级标准值^[10]分别为 0.06、0.08、0.10 mg/m^3 。2002—2006 年,南京市 PM_{10} 的年均值为 0.109~0.148 mg/m^3 ,历年平均值均超标,污染严重; SO_2 仅于 2006 年超标; NO_2 质量浓度年平均值低,历年均未超标(图 1)。

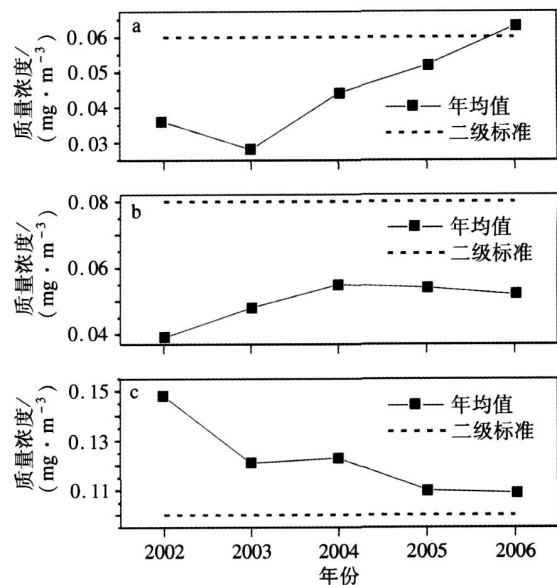


图 1 2002—2006 年南京市 SO_2 (a)、 NO_2 (b) 和 PM_{10} (c) 年均值

Fig 1 Annual mean mass concentrations of (a) SO_2 , (b) NO_2 and (c) PM_{10} in Nanjing from 2002 to 2006

采用 Daniel趋势检验定量分析其逐年变化^[11]:

$$s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{N^3 - N} \quad (1)$$

式中: s 为 Spearman 秩相关系数; N 为时间周期(年); d_i 为变量 X_i 和变量 Y_i 之差; X_i 对应各时间周期按浓度值从小到大排列的序号; Y_i 对应各时间周期按时间排列的序号。 s 为负,呈下降趋势;反之则为上升趋势。若 $|s| > W_p$ (秩相关系数统计表中的临界值),表明变化趋势有显著意义。此处样本数 $N = 5$,查表知 $W_p = 0.9$ 。

经检验,SO₂ 的 $s = 0.9 = W_p$,说明 2002—2006 年南京市 SO₂ 质量浓度呈上升趋势,且趋势显著。这与南京市的能源结构有关。SO₂ 主要来源于含硫燃料的燃烧,南京市全年燃煤量逐年增加(2002—2006 年分别为 1 313.59、1 428.59、1 614.70、1 847.39、2 019.16 万 t)^[12],导致 SO₂ 污染加剧。NO₂ 的 $s = 0.6 < W_p$,即从整体上看 NO₂ 质量浓度上升,但趋势不显著。NO₂ 的人为源主要是燃料的燃烧,一般 2/3 来自汽车等流动源的排放^[13]。南京市机动车辆拥有量逐年增加(2002 年底为 44 万辆,2006 年底为 73 万辆)^[12]。但在机动车数量持续增加的大前提下,NO₂ 质量浓度先上升后缓慢下降,可能是由于近年南京市出台机动车尾气管管理的新政策,逐步提高上路机动车辆尾气排放标准所致,但仍需进一步取得尾气排放量的统计数据加以证实。PM₁₀ 的 $s = -0.9$,呈明显下降趋势,说明南京市对尘类污染的控制治理取得了一定的成效。

2.2 污染物的月、季变化

我国现行的大气环境标准中只有污染物的年、日标准,而无月、季标准。本文采用指数法^[14]确定了月、季标准值:

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (2)$$

式中: C_1 为年标准值; C_2 为日标准值; T_2 为标准时间,取 365; T_1 为日标准时间,取 1。将 SO₂、NO₂、PM₁₀ 的年、日标准质量浓度值及时间值代入式中,得。再分别将季、月时间值代入相应的式中即可得其季、月标准质量浓度值。求得 SO₂、NO₂、PM₁₀ 的月二级标准值分别为 0.088、0.095 和 0.119 mg/m³,季二级标准为 0.074、0.088 和 0.110 mg/m³。从图 2 所示的污染物月均值可见,SO₂、NO₂ 月均质量浓度均达到了相应的月二级标准。具体而言,SO₂ 质量浓度 12 月最高,为 0.063

mg/m³,5—8 月质量浓度低,小于等于 0.04 mg/m³。NO₂ 质量浓度 11 月最高,为 0.064 mg/m³,7、8 月最低。PM₁₀ 月均值较高,除 2、7、8、9 月外,其他月都超标。PM₁₀ 3 月最高,为 0.140 mg/m³,4 月和 11 月略低,均为 0.137 mg/m³,8 月最小,为 0.088 mg/m³。此外,PM₁₀ 与 NO₂ 的月变化的相关性较好,相关系数为 0.722,PM₁₀ 与 NO₂ 的日变化曲线也具有相似性^[15]。说明 PM₁₀ 与 NO₂ 的质量浓度变化可能由相同的原因引起——均与机动车行驶所产生的污染关系密切,机动车辆增加引起的道路颗粒物的增加对 PM₁₀ 的增加有重要贡献。

从季节变化看,SO₂、NO₂ 季节平均质量浓度均达标。PM₁₀ 除了夏季达标,其他季节均超标。夏季大气对流发展强烈,易于污染物的扩散^[16],且夏季多降雨过程,对污染物起冲刷作用。而且夏季燃煤少,污染源少,故 3 种污染物质量浓度均以夏季最低。SO₂ 污染以冬季最为严重,冬季采暖燃煤量增加,且大气层结较稳定。NO₂ 的主要排放源是机动车,机动车排放的月变化不明显,因此 NO₂ 月均质量浓度值的标准差三者中最小。NO₂ 秋季稍多,可能与郊区大量焚烧秸秆有关。PM₁₀ 污染以春季为最,初春刮风时容易将裸露的地面尘土和微尘卷起,多扬沙、浮尘天气^[16],颗粒物质量浓度值处于较高的污染水平。

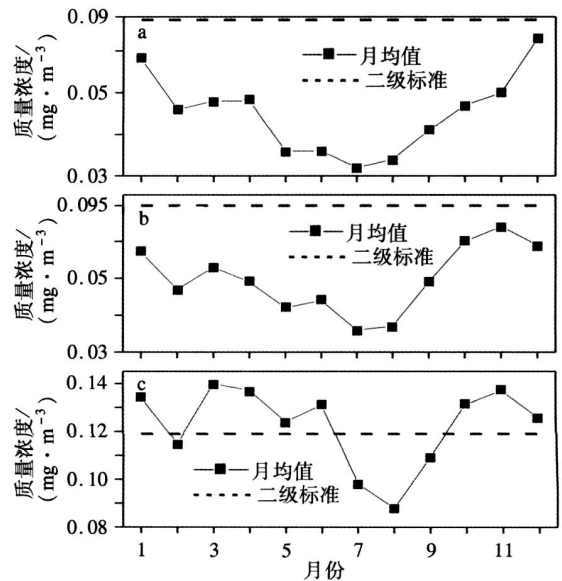


图 2 南京 SO₂ (a)、NO₂ (b)、PM₁₀ (c) 质量浓度月均值变化情况

Fig 2 Monthly mean mass concentrations of (a) SO₂, (b) NO₂ and (c) PM₁₀ in Nanjing

2.3 南京市环境空气质量评价

以 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 为评价因子,采用空气污染物负荷系数法^[17]对空气质量进行评价。以国家环境空气二级标准为基数,计算各项指标的分指数 P_i ($P_i = \text{质量浓度值} / \text{标准值}$) 和各项指标分担率 F_i ($F_i = P_i / \sum_{i=1}^3 P_i$), 根据污染分担率的大小筛选主要污染因子。由表 1 知, PM_{10} 的污染物分指数最大, 分别占 39.07% ~ 57.64%, 是南京市环境空气中的首要污染物。除 2003 年外, SO_2 的污染分指数都排第 2, NO_2 第 3, 且 SO_2 的污染负荷系数的上升趋势较 NO_2 明显, 由此判断南京市空气污染尚属煤烟型污染。综合污染指数 2006 年最高, 2003 年最低; 综合指数的年均变化不大。

采用日空气污染指数 (air pollution index, 简称 API) 对南京各污染物做进一步分析^[18]。API 将常

规检测的空气污染物浓度简化成单一的概念性指数, 指数分为 5 级, 其中 3 级或以上污染指数会对人体和环境产生危害。 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 的 API 日 3 级标准分别为 0.150 mg/m^3 、 0.12 mg/m^3 、 0.150 mg/m^3 (相当于国家环境质量日二级标准)。研究发现, 5 a 来, SO_2 、 NO_2 日均值出现 3 级以上水平的天数很少, 分别为 3 d 和 15 d。 PM_{10} 超过 3 级以上标准的日数很多, 各月均有发生。 PM_{10} 年均污染超标日为 93.4 d, 超标率达 26%, 其中以春季 3 月最多, 为 13 d; 1 月、11 月、12 月也较多。 PM_{10} 超过 4 级标准 (0.350 mg/m^3) 以上天数 13 d, 春、秋、冬季都有发生; PM_{10} 超过 5 级标准 (0.420 mg/m^3) 的天数也有 5 d, 这也从另一个角度说明了南京市 PM_{10} 污染较 SO_2 、 NO_2 严重。

表 1 2002—2006 年南京市污染指数

Table 1 The pollutant index of the atmosphere in Nanjing from 2002 to 2006

年份	SO_2		NO_2		PM_{10}		综合指数 P_i	首要污染物
	污染指数	负荷系数	污染指数	负荷系数	污染指数	负荷系数		
	P_i	$F_i / \%$	P_i	$F_i / \%$	P_i	$F_i / \%$		
2002	0.60	23.37	0.49	18.99	1.48	57.64	2.57	PM_{10}
2003	0.47	20.50	0.60	26.35	1.21	53.15	2.28	PM_{10}
2004	0.73	27.66	0.69	25.94	1.23	46.40	2.65	PM_{10}
2005	0.87	32.81	0.68	25.55	1.10	41.64	2.65	PM_{10}
2006	1.05	37.63	0.65	23.30	1.09	39.07	2.79	PM_{10}

3 影响空气污染物散布的因子

3.1 风速对污染物的影响

风速是影响大气扩散条件的重要因素。取 2006 年大校场气象资料逐日 8 个时刻 (02: 00、05: 00、08: 00、11: 00、14: 00、17: 00、20: 00、23: 00) 的

风速平均值为日均风速。从表 2 可见, 随着风速的增大, SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 的质量浓度值均单调递减, 这是因为风有利于污染物的扩散, 风速越大, 单位时间内污染物被输送的距离就越远, 与空气的混合也越充分, 单位体积空气中污染物的含量就越低, 即质量浓度越低^[19]。

表 2 2006 年风速与 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 质量浓度值关系

Table 2 The relationship between mass concentrations of pollutants and wind speed in 2006

风速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{SO}_2 / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{NO}_2 / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{PM}_{10} / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	样本数
0 $W_s < 1.5$	0.077	0.069	0.160	39
1.5 $W_s < 2.5$	0.067	0.057	0.119	100
2.5 $W_s < 3.5$	0.061	0.050	0.102	123
3.5 $W_s < 4.5$	0.062	0.045	0.096	63
4.5 $W_s < 5.5$	0.050	0.042	0.086	23
5.5 $W_s < 6.5$	0.047	0.038	0.071	9
$W_s \geq 6.5$	0.039	0.030	0.063	5

3.2 降水对污染物的影响

SO₂ 溶于水而部分变成 H₂SO₃ 或经氧化反应变为 H₂SO₄, NO₂ 溶于水生成 HNO₂ 和 HNO₃, 颗粒物与雨滴碰撞可附着在雨滴上或溶于水滴中并随着降水沉降到地面, 因而降水对清除空气污染物起着重要的作用^[20]。首先, 降水影响污染物浓度的季节性变化。南京的降水量季节分布不均匀, 2006 年降水量以夏季最多, 为 418.9 mm; 冬季最少, 为

164.2 mm; 春、秋季分别为 212.4、238.0 mm。1905—1994 年南京降雨量平均资料也显示, 夏季占年总量的 45.0%, 春季占 25.1%, 秋季占 18.9%, 冬季占 11.0%^[16]。即夏季对污染物湿沉降作用明显, 空气相对清洁, 而秋冬季污染物可有更长的时间积蓄, 污染较重。其次, 在任何季节, 雨雪天的环境空气污染物浓度都会降低。由于降水的清洁作用, 使得降水日的污染物浓度始终低于非降水日(表 3)。

表 3 2006 年南京各季节降水日与非降水日污染物质量浓度

Table 3 A comparison of the seasonal mean mass concentrations of pollutants in precipitation and non-precipitation days in Nanjing in 2006

污染物	春季 (3—5 月)		夏季 (6—8 月)		秋季 (9—11 月)		冬季 (12 月—次年 2 月)	
	降水日	非降水日	降水日	非降水日	降水日	非降水日	降水日	非降水日
SO ₂	0.066	0.068	0.041	0.045	0.060	0.073	0.064	0.084
NO ₂	0.058	0.059	0.037	0.039	0.048	0.059	0.051	0.059
PM ₁₀	0.124	0.132	0.088	0.094	0.085	0.132	0.090	0.111

3.3 霾、雾天气与污染物浓度的关系

霾、雾等恶劣能见度的天气现象产生于近地面大气层结比较稳定的条件下, 形成时, 风力温和、湍流较弱, 并常伴有较强逆温的存在^[21]。霾层或雾层内大气边界层的结构不利于空气污染物扩散, 所以霾、雾的出现通常会加剧地面空气污染状况。另一方面, 相对湿度饱和时, 污染大气中的可溶性气溶胶(如 NaCl、NH₄Cl、Na₂SO₄ 等)可充当凝结核, 吸湿成长为雾滴; 而相对湿度较低时, 空气中大量的干性尘埃、烟粒、盐粒(尤其是其中的细颗粒物)以及气体前体物(SO₂、NO₂、CO、O₃ 等)使大气混浊, 视野模糊并导致能见度恶化, 当水平能见度小于 10 km 时则成为霾, 即污染物对霾、雾的生成发展也会有重要的影响。

南京市的霾日分别为 147、140、135、144 和 152 d, 气候概率已超过 1/3, 因此霾天气与 SO₂、NO₂、PM₁₀ 之间的关系引起了更多的关注^[22]。分析结果表明, 南京市霾日 SO₂、NO₂、PM₁₀ 污染均明显重于非霾日。2002—2006 年霾日 PM₁₀ 的质量浓度平均值高出日均值 31.4%, SO₂ 高出 24.4%, NO₂ 高出 20.1%, 三者中 PM₁₀ 与霾的关系最为密切, 这是由霾的颗粒物本质决定的^[23]。从月均值看, 霾天污染物浓度均高于其月均值(图 3)。雾发生在特定的大气边界层, 而雾发生后又改变边界层特征, 造成了烟羽上部的污染物堆积, 下部迅速向地面输送, 使得地面监测到的污染气体出现高浓度现象^[24], 本文的分析结果也证实了雾天能加剧污染(表 4)。

南京站地面气象观测记录显示, 2002—2006 年

表 4 2002—2006 年雾、霾天气条件下 SO₂、NO₂、PM₁₀ 平均质量浓度

Table 4 The mean concentrations of pollutants in hazy and foggy days from 2002 to 2006

天气条件	SO ₂ / (mg · m ⁻³)	NO ₂ / (mg · m ⁻³)	PM ₁₀ / (mg · m ⁻³)	样本数
雾日	0.053	0.069	0.201	139
霾日	0.055	0.060	0.161	703
所有天气条件	0.045	0.050	0.122	1 791

3.4 SO₂、NO₂、PM₁₀ 的“周末效应”

近期的研究表明, 全球很多站点的天气要素(如最高、最低气温, 气温日较差等)在周中和周末存在明显的差别^[25]。大气气溶胶质量浓度、污染物

质量浓度、降水、气温等要素的这种周循环被称为周末效应^[26]。本文分析了 5 a 来 SO₂、NO₂、PM₁₀ 周内的质量浓度变化(图 4), 发现南京市污染物的浓度变化出现了明显的“周末效应”。无论何种污染物,

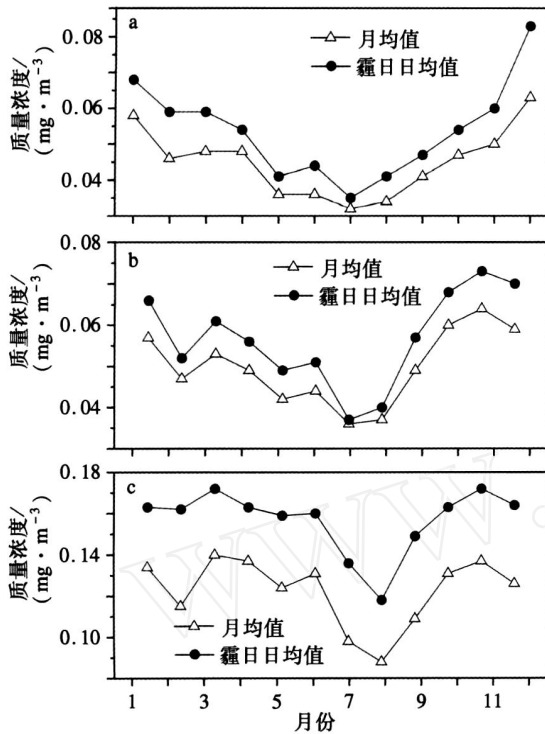


图 3 2002—2006 霾日 SO_2 (a)、 NO_2 (b)、 PM_{10} (c) 质量浓度月均值

Fig. 3 The monthly mean mass concentrations of (a) SO_2 , (b) NO_2 and (c) PM_{10} in hazy days from 2002 to 2006

其周末的质量浓度值均小于年平均值,而工作日的质量浓度值大于年平均值(周一 SO_2 、 NO_2 浓度除外)。就周内变化而言, SO_2 、 NO_2 规律类似,周中质量浓度值高(周三最高),周末低(周六最低); PM_{10} 星期一到星期三质量浓度高(星期二最高),星期四到星期日质量浓度低(星期六最低,星期天次之)。这与 Jin 等^[27]观察到的美国纽约地区夏季气溶胶光学厚度星期三最高,周末最低的结果相类似。

污染物质量浓度变化的“周末效应”与人类活动密切相关,可能是由于人类按照工作日、周末划分和安排作息,致使工作日的工业生产和汽车行驶等排出的更多污染物进入大气,因而大气中污染物质量浓度按照 7 d 周期有规律的变化,导致“周末效应”产生。研究还表明,周末两日 NO_2 质量浓度相当; SO_2 、 PM_{10} 星期天的值却明显高于星期六的值,以 PM_{10} 的差异最为显著。造成该显著差异的原因有待进一步研究。

4 结论

(1) 2002—2006 年南京市 PM_{10} 污染较严重,各

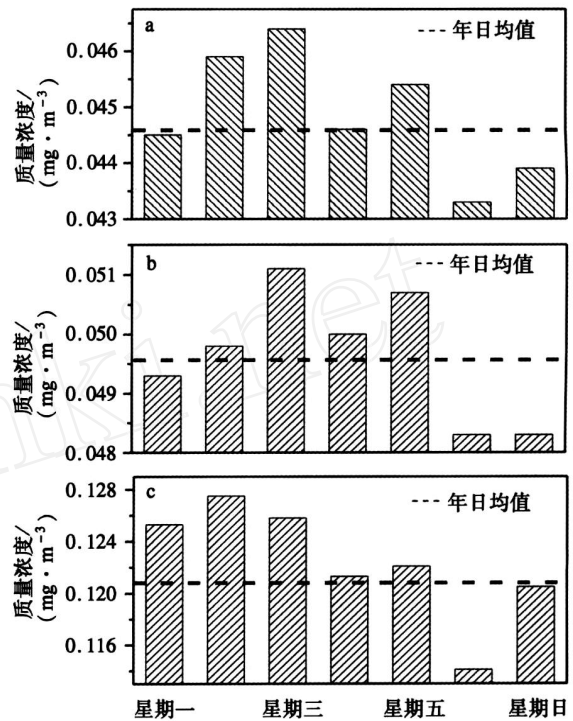


图 4 SO_2 (a)、 NO_2 (b)、 PM_{10} (c) 的“周末效应”

Fig. 4 The Weekend Effect of (a) SO_2 , (b) NO_2 and (c) PM_{10}

年均值都超标,月、季均值大多超标。 PM_{10} 的污染分指数最大,是南京市环境空气首要污染物; SO_2 、 NO_2 的污染较轻,除 2006 年 SO_2 超标外,其他年、月、季均值也均达标,日均值超标的天数也很少。

(2) 2002—2006 年南京市 SO_2 质量浓度呈显著上升趋势。 NO_2 质量浓度上升趋势较缓。 PM_{10} 质量浓度已成明显下降趋势。

(3) 3 种污染物质量浓度均以夏季最低。 SO_2 污染以冬季最为严重, NO_2 秋季质量浓度最高, PM_{10} 污染以春季为最。

(4) 污染物质量浓度与风速反相关;降水对污染物有清除作用;雾霾天气下, SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 污染均加剧。

参考文献:

- [1] Shaddick G, Wakefield J. Modelling daily multivariate pollutant data at multiple sites [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2002, 51 (2): 351-362
- [2] Fuentes M, Song H R, Ghosh S K, et al. Spatial association between speciated fine particles and mortality [J]. Biometrics, 2006, 62 (5): 855-863.
- [3] 王明星. 大气化学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 1999: 156-160.

- [4] 夏立江. 环境化学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003: 159-163.
- [5] 王会祥, 唐孝炎, 邵可声, 等. 长江三角洲痕量气态污染物的时空分布特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(2): 114-118.
- [6] 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区大气 O₃ 和 PM₁₀ 的区域污染特征模拟 [J]. 环境科学, 2008, 29(1): 237-245.
- [7] 樊曙先, 杨关盈, 朱彬, 等. 长江三角洲区域本底大气中致酸气体体积分数变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(6): 803-810.
- [8] 朱彬, 安俊岭, 王自发, 等. 光化学臭氧日变化特征与其前体物关系的探讨 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(6): 744-749.
- [9] 余瑶, 刘品高, 陈万隆. 上海市气象场与 SO₂ 浓度数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(1): 47-55.
- [10] 国家环境保护局. GB 3095—1996 中华人民共和国国家标准环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [11] 中国环境监测总站. 环境资料汇编 [M]. 北京: 中国科学出版社, 1998: 98-99.
- [12] 南京市环境状况公报 (2002—2006) [EB/OL]. [2007-05-06]. <http://www.njhb.gov.cn/col/col84/index.html>
- [13] 唐孝炎, 李金龙, 栗欣, 等. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 32-98.
- [14] 国家环境保护局, 中国环境科学院. 城市大气污染物总量控制方法手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991: 105-106.
- [15] 陈建江. 南京市空气质量时间变化规律及其成因 [J]. 环境监测管理与技术, 2003, 15(3): 16-17; 41.
- [16] 周曾奎, 朱定真, 吴震, 等. 南京城市气候及其灾害性天气 [M]. 北京: 气象出版社, 1999: 27-55.
- [17] 李悦. 大气环境质量综合指数计算方法的研究及其应用探讨 [J]. 青岛大学学报, 1996, 11(4): 57-60.
- [18] 张建辉, 佟彦超, 夏欣, 等. 环境监测学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001: 22-24.
- [19] 蒋维楣. 空气污染气象学 [M]. 南京: 南京大学出版社, 2003: 9-10.
- [20] 蒋维楣, 孙鉴宁, 曹文俊, 等. 空气污染气象学教程 [M]. 北京: 气象出版社, 2004: 12.
- [21] 揭武. 大气污染对雾、霾形成影响的初步探讨 [J]. 环境科学与技术, 1982, (Z1): 53-56.
- [22] 徐梅, 朱玉强, 余文韬. 天津地区灰霾特征初步分析 [C] // 中国颗粒学会 2006 年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会. 北京: 中国颗粒学会, 2006: 492-496.
- [23] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 584-588.
- [24] 郭立平, 张素云. 冀中滨海平原大雾的形成特征及变化 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 359-364.
- [25] Forster PM, Solomon S. Observations of a weekend effect in diurnal temperature range [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(20): 11225-11230.
- [26] 龚道溢, 郭栋, 罗勇. 中国夏季日降水频次的周末效应 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(3): 131-134.
- [27] Jin M, Shepherd JM, King M D. Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study for New York and Houston [J]. J Geophys Res, 2005, D10S20, doi: 10.1029/2004JD005081.

(责任编辑: 马奋华)