

兰州市 PM₁₀ 污染变化特征及其成因分析

余晔¹, 夏敦胜², 陈雷华¹, 刘娜¹, 陈晋北¹, 高艳红¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所西部气候环境和灾害实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要 利用 2001 年 1 月~2007 年 12 月兰州市空气质量日报数据, 结合时间尺度分离法, 分析研究了兰州市 PM₁₀ 污染的年、季变化特征、年变化趋势及其成因。结果表明, 2001 年以来兰州市 PM₁₀ 污染有所减轻, 年日均 PM₁₀ 浓度由 2001 年的 236 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 2007 年的 127 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量为优、良的天数增加了 1.3 倍, 但年平均 PM₁₀ 浓度仍超过国家二级标准, 超标率为 25%。PM₁₀ 污染存在明显的季节变化, 冬半年的 11 月、12 月和 1~4 月 PM₁₀ 浓度较高, 月平均最大值和次大值分别出现在 12 月 (271 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 3 月 (245 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。5~10 月 PM₁₀ 浓度较低, 基本维持在 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。61.2% 的中度污染和 50.6% 的重度污染发生在冬季, 67.4% 的优良天数出现在夏季和秋季。2001~2007 年, 兰州市 PM₁₀ 浓度每年下降 12.6% 与兰州市烟、粉尘年排放量变化趋势一致; 由于沙尘、浮尘天气造成的自然尘排放量的年际变化对 PM₁₀ 浓度年际变化趋势的贡献约为 21%, 而局地气象条件的扰动对 PM₁₀ 浓度年际变化的影响很小。近年来兰州市 PM₁₀ 污染状况的改善主要是由本地污染物排放量的减少造成的, 同时也受沙尘、浮尘天气年际变化的影响, 要长期有效地改善兰州市大气环境质量, 不仅要制定科学合理的本地减排措施, 还应考虑周围生态环境的改善。

关键词 兰州市; PM₁₀; 空气污染指数 (API); 变化特征; 时间尺度分离法

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0022-07

Analysis of Particulate Pollution Characteristics and Its Causes in Lanzhou, Northwest China

YU Ye¹, XIA Dun-sheng², CHEN Lei-hua¹, LIU Na¹, CHEN Jin-bei¹, GAO Yan-hong¹

(1. Laboratory for Climate, Environment & Disasters of Western China, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Seasonal characteristics, annual variations and trend of PM₁₀ and the causes of the PM₁₀ long-term trend in Lanzhou were studied for the period of 2001-2007 using daily air pollution index (API) data and detrending technique. Results indicate that air quality in Lanzhou has been improved since 2001. The annual averaged PM₁₀ concentration decreased from 236 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2001 to 127 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2007 and the number of days satisfying the Chinese Grade I and II air quality standard increased 2.3 times as 2001, but there still have 25% days exceeding the national Grade II air quality standard. Monthly mean PM₁₀ concentration undergoes a seasonal change characterized by higher values in November, December and January to March. The maximum monthly average PM₁₀ concentrations appear in December (271 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) followed by March (245 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) while it is low during summer months (May to October) with monthly average PM₁₀ concentrations below 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 61.2% of moderate pollution and 50.6% of serious pollution days occurred in winter and 67.4% of Grade I and II days occurred in summer and autumn. Analyses show that annual mean PM₁₀ concentrations decreased at a rate of 12.6% over the past 7 years which correlates well with the reductions in anthropogenic dust emissions. The occurrence of blowing dust and floating dust can modulate the overall trend of PM₁₀, which explains about 21% of the inter-annual variations of PM₁₀ during 2001-2007. The changes of local meteorological conditions have little effect on the overall trend of PM₁₀ concentrations. The improvement of air quality in Lanzhou is mainly due to the reduction of local emissions, with contributions from the variation of natural dust emissions due to annual variations of blowing and floating dust events. To further improvement of the air quality in Lanzhou, it is advisable to not only implement effective emission control strategies but also improve surrounding ecological environment.

Key words Lanzhou; PM₁₀; air pollution index (API); seasonal variation; detrending technique

大气可吸入颗粒物 (PM₁₀, 空气动力学直径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物) 是影响我国北方城市大气环境质量的首要污染物^[1,2], 其来源包括化石燃料燃烧、工农业生产活动等人为过程和地表扬尘、海洋飞沫、火山尘等天然过程以及二次气溶胶粒子等非均相化学

反应过程等。大气可吸入颗粒物由于其对全球气候

收稿日期: 2009-01-14, 修订日期: 2009-07-03

基金项目: 中国科学院“引进国外杰出人才”项目; 中国科学院寒区旱区

环境与工程研究所“人才基金”项目

作者简介: 余晔 (1973~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为城市和区域大气环境, E-mail: yuyu@lzb.ac.cn

变化、大气能见度以及人体健康的影响已经引起科学界的广泛重视^[3,4],是近年来大气环境研究的重要对象之一.对西部典型城市大气 PM₁₀ 污染特征、变化趋势及其成因进行分析,对探索大气污染治理途径、预防大气污染事件的发生以及实现地方经济的可持续发展有重要的意义.

兰州市地处青藏高原东北侧的黄河河谷盆地,三面临山,南北两侧山的相对高度分别为 300~600 m 和 200~300 m.受独特的地势、地貌和周围脆弱的自然生态环境(如气候干燥、植被稀疏、自然和二次扬尘量较大等)以及局地盆地小气候(如静风频率大、逆温层厚、强度大等)的影响,兰州市大气污染非常严重,特别是大气可吸入颗粒物污染^[5].早在 20 世纪 80 年代,科研人员就开始了针对兰州市大气污染成因方面的研究^[6,7],在兰州市冬季大气污染形成的物理机制和成因^[7,8]、颗粒物污染特征^[5,9,10]和化学性质^[11,12]以及春季沙尘影响^[13~15]等方面取得了许多研究成果.为了探讨行之有效的污染预报方法,还对兰州河谷盆地内污染气象条件、气象参数特征及其与污染物浓度之间的关系进行了研究^[16,17].近年来,为了提高兰州市大气环境质量,改善人居环境,地方政府先后实施了集中供热、蓝天工程、绿化工程等污染治理措施,市区污染物排放和生态环境发生了变化,这将改变兰州市污染的气候特征,并对其大气环境产生影响.兰州市大气污染现状如何?这些污染治理措施对兰州市空气质量的影响如何?这些都是科学地提出改善兰州市大气环境质量措施所必须回答的问题.以往研究在对兰州市空气质量变化趋势进行分析时,只是简单地将空气质量的长期变化归因于污染物排放量的变化,很少将污染物排放和气象条件影响加以区分,缺少对不同过程影响的分析.近年来,国内外学者发展了各种从污染物时间变化序列中去除气象条件影响以对污染治理措施的有效性进行评估的方法^[18~22],如 Rao 等^[18]方法和 Kuebler 等^[20]的 detrending technique(文中将其译为时间尺度分离法).空气污染指数也已被广泛地应用于空气质量的评估研究中^[21,23].本研究的目的是利用 2001 年 1 月~2007 年 12 月兰州市空气质量日报数据,分析兰州市 PM₁₀ 浓度的年、季变化特征,并利用时间尺度分离法将影响 PM₁₀ 污染年际变化趋势的不同过程加以分离,探讨污染治理措施以及气象条件对兰州市大气 PM₁₀ 浓度长期变化趋势影响的相对重要性,以期科学地提出控制兰州市大气污染和改善城市环境的措施提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究资料

本研究所用资料包括 2001~2007 年兰州市空气污染指数资料、兰州市环境状况公告中的污染物年排放数据以及相应时段的地面气象要素观测资料.其中空气污染指数(air pollution index, API)资料取自中华人民共和国环境保护部数据中心收集的兰州市空气质量日报数据,覆盖时间段为 2001 年 1 月~2007 年 12 月共 7 a.根据 1996 年颁布的我国大气环境质量标准,我国城市空气质量根据 API 的取值范围被分为 5 个等级,各级对应的 API 取值范围和 PM₁₀ 浓度见表 1.近地面气象数据取自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的甘肃省气候资料日值数据集中 2001~2007 年兰州市地面气象日值数据.该数据集包含以下气象要素:平均本站气压、日最高本站气压、日最低本站气压、平均风速、平均气温、日最高气温、日最低气温、平均相对湿度、日降水量和日照时数.

1.2 分析方法

首先用常规的统计分析方法对兰州市空气质量的年、季变化特征进行分析.由于大气中污染物的浓度受污染物排放量和气象条件的共同影响,为了分析兰州市 PM₁₀ 浓度的变化趋势及其成因,需要将这 2 个影响因素进行分离.这里采用时间尺度分离法(detrending technique)^[20]将 PM₁₀ 浓度的时间变化序列分解成不同时间尺度变化的和,即:

$$\rho(t) = \rho^{LT}(t) + \rho^S(t) + \rho^W(t) + \rho^{ST}(t) + \rho^R(t) \quad (1)$$

式中 $\rho(t)$ 是原始时间序列; $\rho^{LT}(t)$ 是 PM₁₀ 浓度的长期变化趋势; $\rho^S(t)$ 是由气象条件和污染物排放量的季节变化引起的 PM₁₀ 浓度的季节变化; $\rho^W(t)$ 是一周内由于工作日或节假日造成的污染物排放量变化引起的 PM₁₀ 浓度变化; $\rho^{ST}(t)$ 是由短时间尺度(1~2 d)的气象条件和污染物排放量变化造成的 PM₁₀ 浓度变化; $\rho^R(t)$ 是不能由上述各项描述的剩余项.长期变化趋势 $\rho^{LT}(t)$ 主要包含了由污染治理措施、经济发展等影响污染物排放量变化的因素造成的 PM₁₀ 浓度变化,也可能包含长期气候因素变化的影响,如降水量变化或土地利用的变化会对大气颗粒物的自然源强产生影响.将原始 PM₁₀ 浓度时间序列分解成不同时间尺度的分量有助于对不同过程的影响进行分析.根据文献[20],首先用 Kolmogorov-

Zurbenko 滤波对原始数据进行处理以提取长期变化趋势. Kolmogorov-Zurbenko 滤波是一种低通滤波^[24], 通过简单滑动平均的重复迭代来实现, 每一次迭代通过式(2)计算.

$$Y_t = \frac{1}{m} \sum_{s=-(m-1)/2}^{(m+1)/2} X(t+s) \quad (2)$$

式中, m 是滤波窗口长度, X 是原始时间序列, Y_t 可作为下一次迭代的输入, 依次类推. 本研究取滤波窗口长度为 365 d, 迭代 3 次, 得到长期变化趋势 $\rho^{LT}(t)$. 然后建立一个去除了长期变化趋势的标准化时间序列 $\Delta\rho(t) = [\rho(t) - \rho^{LT}(t)] / \rho^{LT}(t)$, 则季变化和周变化可以从一个由 52 周, 每周 7 d 的“平均年”(mean year $\Delta\rho_{\text{mean}}$) 得到, 即:

$$\Delta\rho_{\text{mean}}(t^*) = \frac{1}{N_{\text{year}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{year}}} \Delta\rho(t^* + (52 \times 7)(i-1)) \quad (3)$$

式中, $t^* = 1, 2, \dots, 365$, N_{year} 是原始数据的长度, 单位为 a. 利用得到的长期变化趋势 $\rho^{LT}(t)$ 和“平均年” $\Delta\rho_{\text{mean}}$, 可以得到一个只包含长期变化趋势、季节变化和周变化的时间序列.

$$\bar{\rho}(t) = \rho^{LT}(t) + \rho^{LT}(t) \times \Delta\rho_{\text{mean}}[t - (52 \times 7)(i-1)] = \rho^{LT}(t) + \rho^S(t) + \rho^W(t) \quad (4)$$

式中 $i = 1, \dots, N_{\text{year}}$. 从原始时间序列中减去 $\bar{\rho}$ 就可以得到式(1)中最后 2 项的和.

$$R(t) = \rho^{ST}(t) + \rho^R(t) = \rho(t) - \bar{\rho}(t) \quad (5)$$

再将 $R(t)$ 作为因变量, 气象参数 (M) 作为自变量进行线性回归, 最佳拟合即为 $\rho^{ST}(t)$, 即:

$$\rho^{ST}(t) = a_0 + a_1 M_1(t) + \dots + a_n M_n(t) \quad (6)$$

不同地区的研究表明^[25, 26] 相对湿度、气温和风速是影响大气中 PM_{10} 浓度的主要气象因子. 本研究通过相关分析选取与 PM_{10} 浓度相关系数最高的日最高气温 (T_{max}), 日均相对湿度 (RH) 和风速 (WS) 作为式(6)中的气象因子. 这些气象参数中日最高气温可以反映白天对流发展状况; 相对湿度反映水汽发生凝结的可能性; 风速对污染物的稀释和扩散有重要作用. 线性回归分析结果为:

$$\rho^{ST}(t) = 54.819 - 0.953 \times RH(t) - 20.65 \times WS(t) + 0.854 \times T_{\text{max}}(t) \quad (7)$$

自然降水对大气中的污染物有清除作用, 是一种重要的湿清除过程^[27], 但回归分析表明, 增加降水因子后, 回归分析结果并未得到明显改善, 因此在以下的分析中采用式(7)计算去除气象条件影响后的 PM_{10} 浓度时间序列, 即:

$$\rho_{\text{PM}_{10}\text{-detrended}} = \rho(t) - \rho^{ST}(t) - \rho^S(t) - \rho^W(t) \quad (8)$$

以上方法已被证明能够很好地分离不同时间尺度污染物浓度的变化, 并被用于分析污染物排放控制措施对大气中污染物浓度长期变化趋势的影响^[20].

2 兰州市 PM_{10} 污染变化特征

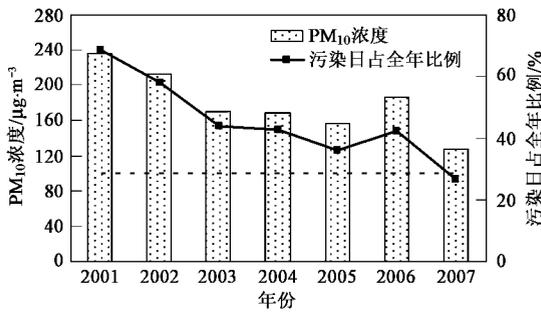
2001~2007 年兰州市的首要污染物绝大多数情况下是可吸入颗粒物, 占总污染天数的 96% 以上, 且在以二氧化硫为首要污染物的天数中, 二氧化硫造成的污染一般在良和轻微污染以下, 因此空气质量等级主要是由 PM_{10} 污染程度描述的, 空气污染等级的变化特征也是 PM_{10} 污染的变化特征. 以下分析中所用的 PM_{10} 浓度是根据文献 [28] 中的方法, 由空气污染指数换算得到的, 即:

$$\rho_{\text{PM}_{10}} = [(I - I_L)(I_H - I_L)] \times (\rho_H - \rho_L) + \rho_L \quad (9)$$

式中, I_L 和 I_H 是与 I 值 (即 API) 最接近的 API 分级上、下限; ρ 表示质量浓度; ρ_H 和 ρ_L 是与 I_L 和 I_H 相对应的 PM_{10} 浓度值.

2.1 年际变化特征

图 1 给出了兰州市 2001~2007 年全年日平均 PM_{10} 浓度和 1 a 中空气质量大于等于 III 级 (日均 $\text{PM}_{10} \geq 250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 简称污染日) 出现频率的年际变化特征. 可以看出, 兰州市 2001~2007 年, 年平均 PM_{10} 浓度和年污染日出现频率总体上波动式减少, 年日均 PM_{10} 浓度由 2001 年的 $236 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 2007 年的 $127 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 但即使是空气质量最好的 2007 年, 年均 PM_{10} 浓度仍超过国家二级标准限值 ($100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 超标率在 25% 以上. 从各年不同空气质量级别出现频率的变化 (表 1) 可以看出, 2001~2007 年兰州市污染天数的减少主要是由于空气质量为 III 级天数的减少. 空气质量为 IV 级和 V 级的中、重度污染除了在 21 世纪初 (2001~2004 年) 有明显减少外, 近年来变化不大. 2006 年由于兰州市受沙尘天气影响 (16 次) 较 2005 年 (2 次) 多, 重污染情况明显增多. 各年空气质量为 II 级的情况出现频率最高, 其次是 III 级. 同时也发现, 空气质量为优、良 (I 级和 II 级) 的天数基本上呈上升趋势. 2001~2005 年上升非常明显, 由 2001 年的 31.5% 上升到 2005 年的 63.6%, 增加了 1.3 倍. 从空气质量为 II 级天数的增加速率看, 前 3 年增加迅速, 近几年开始减缓.



图中虚线为年平均 PM₁₀ 浓度国家二级标准限值

图 1 兰州市 2001~2007 年, 全年日平均 PM₁₀ 浓度和污染日占全年比例的变化

Fig. 1 Interannual variation of annual averaged PM₁₀ concentration and frequency of pollution days in Lanzhou during the period of 2001-2007

表 1 兰州市 2001 年 1 月~2007 年 12 月各空气质量级别出现的频数 / %

Table 1 Frequency of days with different pollution levels for the period of 2001-2007 / %

级别	API 值	PM ₁₀ 浓度 ρ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	年份						
			2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
I	0~50	$\rho \leq 50$	1.6	3.8	3.0	1.1	4.1	1.6	7.4
II	51~100	$50 < \rho \leq 150$	29.9	38.1	53.2	56.0	59.5	55.9	65.8
III	101~200	$150 < \rho \leq 350$	47.4	43.3	34.5	38.3	31.8	32.3	20.3
IV	201~300	$350 < \rho \leq 420$	6.8	6.0	4.9	2.5	2.7	2.5	3.6
V	>300	$\rho > 420$	14.2	8.8	4.4	2.2	1.9	7.7	3.0

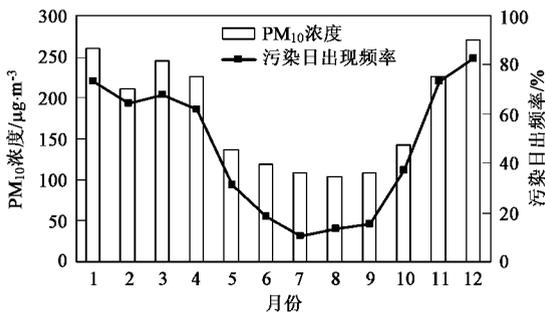


图 2 兰州市 2001~2007 年月平均 PM₁₀ 浓度和污染日在各月出现频率的变化

Fig. 2 Variation of monthly mean PM₁₀ concentration and frequency of pollution days in Lanzhou during the period of 2001-2007

2.2 季节变化特征

图 2 给出了兰州市 2001~2007 年月平均 PM₁₀ 浓度的变化情况. 可以看出, 兰州市 PM₁₀ 浓度有明显的季节变化特征: 冬半年的 11、12 和 1~4 月 PM₁₀ 浓度较高且具有双峰特征, 其中最高值出现在冬季的 12 月, PM₁₀ 浓度达 $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 次高值出现在春季的 3 月, PM₁₀ 浓度为 $245 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 根据 2001~2007 年兰州市日降水量数据, 1a 中 88.8% 的降水量发生在 5~10 月(图 3). 由于降水对污染物的清除, 5~10 月 PM₁₀ 浓度较低, 基本维持在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下. 兰州市地处河西走廊沙尘暴多发区的下风方, 受河西走廊地区沙尘暴天气影响较大. Wang 等^[29]通过对中国 1954~2000 年区域沙尘暴发生次数的统计分析发现, 月平均沙尘暴发生次数在春季出现最大值. 王

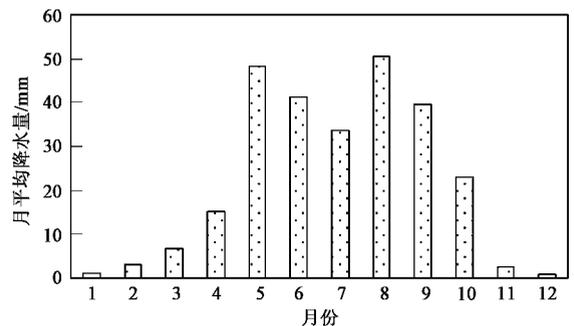


图 3 兰州市 2001~2007 年月平均降水量变化

Fig. 3 Monthly average precipitation in Lanzhou during 2001-2007

染物扩散输送的气象条件, 导致冬季可吸入颗粒物浓度增高. 王式功等^[16]通过对兰州城区月平均最大混合层厚度的研究表明, 兰州城区最大混合层厚度的最小值出现在每年的 12 月, 这可能是造成兰州市冬季 3 个月中 12 月空气质量最差的重要原因之一.

图 4 给出了兰州市 2001~2007 年不同空气质量级别天数在各季节的出现频率. 可以看出, 兰州市空气质量为 I 级和 II 级的天数主要出现在夏、秋两季, 占该等级全年出现次数的 67.4%; III 级轻度污染则主要出现在冬季, 占该等级全年出现次数的

式功等^[14]通过分析 1975~1997 年甘肃河西沙尘暴发生日数和兰州市同期颗粒物污染资料发现, 在沙尘暴频发的春季, 两者呈显著正相关. 因此春季频繁发生的沙尘活动对兰州市春季 PM₁₀ 浓度有一定的影响, 这在本研究第三部分有进一步的阐述. 兰州属中温带大陆性气候, 冬季寒冷, 采暖燃煤会排放大量的颗粒物等污染物, 采暖期颗粒物排放量占全年排放量的 58%^[30], 加上逆温、小风^[7]等不利于大气污

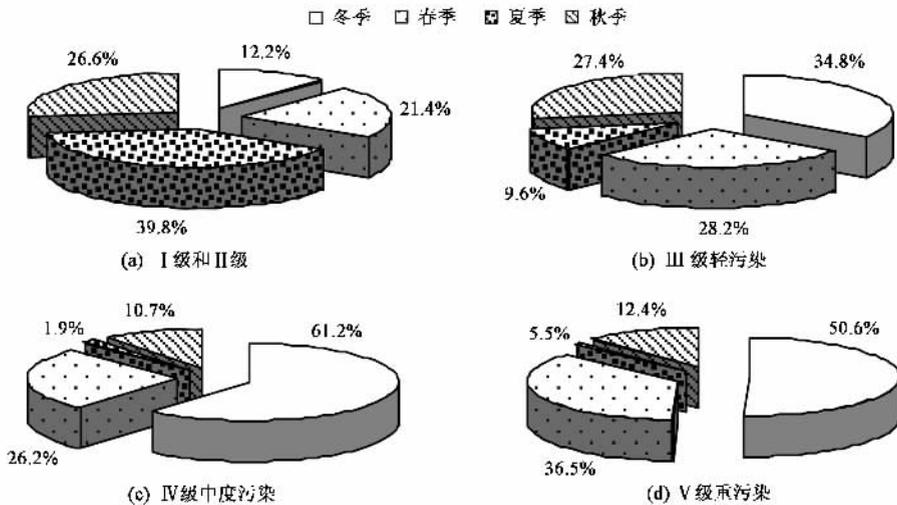


图4 2001~2007年不同级别空气质量天数在各季所占比例

Fig.4 Percentage of days with different pollution levels in the four seasons for the period of 2001-2007

34.8%,春、秋两季次之;IV级中度污染主要出现在冬季,占该等级全年出现次数的61.2%,春季次之,占26.2%;V级重度污染主要发生在冬季,占该等级全年出现次数的50.6%,春季次之,占36.5%。从空气质量大于等于III级天数出现的频率看(图2,实线)秋季(9~11月,特别是11月份)、冬季(12月至翌年2月)和春季(3~5月,特别是3~4月份)出现III级和III级以上污染的频率较大,夏季(6~8月)出现频率较小,这与月平均 PM_{10} 浓度的季节变化趋势基本一致。从以上分析可见,冬季和春季是兰州市大气污染相对严重的季节,一方面冬季是北方城市的采暖期,燃煤排放大量的污染物,另一方面该季气温偏低,大气层结稳定,静风频率高,使污染物不易扩散,导致大气中污染物浓度居高不下,空气质量恶化。我国西北春季气候干燥,降水少,局地自然沙尘排放以及大范围的沙尘暴天气过程等^[14,29]都可使大气中颗粒物浓度增加,污染加重。

3 PM_{10} 污染变化趋势及成因

以往研究^[7,8,14]指出,影响兰州市空气质量的因素主要有3个,即特殊的河谷盆地地形、污染源和气象条件,并在气象条件对兰州市空气质量影响方面做了大量的研究,分析了造成兰州市空气质量季节性差异的原因^[31],但在兰州市 PM_{10} 污染年际变化趋势方面,很少将污染物排放和气象条件影响加以区分,缺少对不同过程影响的分析,本节利用时间尺度分离法对此进行探讨。

利用1.2节给出的方法,对2001~2007年日均 PM_{10} 浓度时间变化序列进行时间尺度分离,得到去除气象条件扰动影响后 PM_{10} 浓度的变化趋势,结果示于图5中(粗实线)。可以看出,总体上 PM_{10} 浓度有明显的下降趋势,除了2006年,平均每年下降12.6%。图5还给出了兰州市烟、粉尘年排放量的变化(细实线)除了2006年,烟、粉尘年排放量平均每年减少约13%。 PM_{10} 浓度变化趋势与烟、粉尘排放量变化趋势一致,说明近年来兰州市大气污染治理措施取得了一定成效。值得注意的是,尽管2003~2005年烟、粉尘年排放量平均每年减少15%, PM_{10} 浓度却只下降了1.7%/a,2006年还出现了 PM_{10} 浓度的增加(与前一年相比增加了15%),且比该年烟、粉尘年排放量的增加(与前一年相比增加了6%)大得多。大量研究指出,土壤、风沙尘是北方城市大气 PM_{10} 的主要成分之一^[28,32]。进一步分析兰州市出现沙尘、浮尘天气的次数(图5,虚线)发现,2004和2006年出现沙尘、浮尘天气次数较多,分别为11次和13次。沙尘、浮尘天气的增多无疑会造成自然尘排放量的增加,进而影响 PM_{10} 浓度的变化。由于自然尘的排放量及其粒径分布不仅与沙尘、浮尘天气出现次数有关,还与沙尘、浮尘天气的强度、地表状况等有关,因此虽然2004年和2006年兰州市发生沙尘、浮尘天气次数相近,其对 PM_{10} 浓度的影响程度却有差异。为了估计兰州市沙尘、浮尘天气对 PM_{10} 浓度年际变化的影响,从 PM_{10} 浓度原始时间变化序列中去除沙尘、浮尘天气影响日后,重新做时间

尺度分离发现,去除沙尘、浮尘天气影响后,PM₁₀ 浓度平均每年下降 9.8%,由此可估算由于沙尘、浮尘天气造成的自然尘排放量的年际变化使 PM₁₀ 浓度平均每年下降 2.7%,即由于沙尘、浮尘天气造成的自然尘排放量的年际变化对 PM₁₀ 浓度年际变化趋势的贡献约为 21%。沙尘、浮尘天气发生次数年际变化较大,就某一年来讲其对 PM₁₀ 浓度变化趋势的贡献可达 56%(2006 年)。另外由于河西沙尘暴活动的年际变化造成的大气环境背景值的变化^[33]也会对图 5 中的 PM₁₀ 浓度变化趋势产生影响,由于缺乏相关资料未对其做进一步的分析。

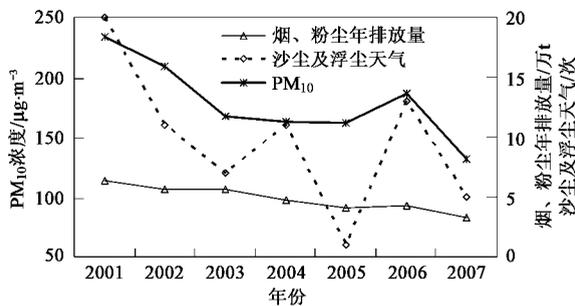


图 5 去除气象条件影响的年平均 PM₁₀ 浓度变化趋势与兰州市烟、粉尘年排放量以及年沙尘、浮尘天气出现次数的对比

Fig. 5 Detrended mean PM₁₀ concentration compared with annual anthropogenic dust emissions and number of days with blowing dust and floating dust

将气象参数观测值代入式(7)可以得到 2001~2007 年间由于气象条件扰动造成 PM₁₀ 浓度增量(ρ^{ST})的长期变化趋势(图 6)。从图 6 可以看出,2001~2004 年,由气象条件扰动造成的 PM₁₀ 浓度增量为正,即局地气象条件不利于 PM₁₀ 的扩散或清除;而 2005 年和 2007 年,PM₁₀ 浓度增量为负,局地气象条件有利于 PM₁₀ 浓度的降低。全年平均,由于局地气象条件扰动造成的 PM₁₀ 浓度变化量在 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,但就某一天而言,局地气象条件扰动造成的 PM₁₀ 浓度变化量可达 $\pm 70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,因此特定的气象条件可造成 PM₁₀ 污染事件,但 2001~2007 年兰州市气象条件的扰动对年均 PM₁₀ 浓度变化趋势的影响很小。从以上分析可以看出,近年来兰州市 PM₁₀ 污染状况的改善主要是由本地污染物排放量的减少造成的,同时也受沙尘、浮尘天气年际变化的影响,要长期有效地改善兰州市大气环境质量,不仅要制定科学合理的本地减排措施,还应考虑周围生态环境的改善。

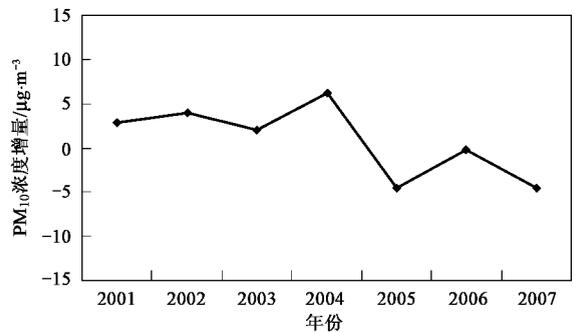


图 6 气象条件变化造成的 PM₁₀ 浓度增量(ρ^{ST})的变化趋势

Fig. 6 Variation of excess PM₁₀ concentration due to meteorological fluctuations

4 结论

(1)兰州市 2001~2007 年,年平均 PM₁₀ 浓度和年污染日出现频率总体上波动式减少,年日均 PM₁₀ 浓度由 2001 年的 $236 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 2007 年的 $127 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,空气质量为优、良的天数增加了 1.3 倍,但年平均 PM₁₀ 浓度仍超过国家二级标准,超标率在 25% 以上。

(2)兰州市 PM₁₀ 浓度有明显的年、季变化特征。冬半年的 11、12 和 1~4 月 PM₁₀ 浓度较高,月平均 PM₁₀ 浓度的最大值和次大值分别出现在冬季的 12 月和春季的 3 月,PM₁₀ 浓度分别达 $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $245 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。5~10 月 PM₁₀ 浓度较低,基本在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下。61.2% 的中度污染和 50.6% 的重度污染发生在冬季,67.4% 的优、良天数出现在夏季和秋季。

(3)利用时间尺度分离法对影响 PM₁₀ 浓度变化的各因素进行了分析,结果表明,近 7 年兰州市大气 PM₁₀ 浓度有明显下降趋势,除了 2006 年,平均每年下降 12.6%,与兰州市年烟、粉尘排放量变化趋势一致;沙尘、浮尘天气的年际变化对 PM₁₀ 浓度的年际变化趋势的贡献多年平均约为 21%,个别年可达 56%。2001~2007 年兰州市局地气象条件向有利于 PM₁₀ 扩散、清除的方向发展,但总体上对年均 PM₁₀ 浓度变化趋势的影响很小。

(4)近 7 年兰州市 PM₁₀ 污染状况的改善主要是由本地污染物排放量的减少造成的,污染减排措施取得一定成效,但同时也受沙尘、浮尘天气年际变化的影响,要长期有效地改善兰州市大气环境质量,还应考虑周围生态环境的改善,以减少与沙尘、浮尘天气有关的自然尘排放的影响。

参考文献:

- [1] 安俊岭,张仁健,韩志伟. 北方 15 个大型城市总悬浮颗粒物的季节变化[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 25-29.
- [2] Ta W Q, Wang T, Xiao H L, *et al.* Gaseous and particulate air pollution in the Lanzhou Valley, China [J]. *Sci Total Environ*, 2004, 320: 163-176.
- [3] Dockery D W, Pope C A. Acute respiratory effects of particulate air pollution [J]. *Ann Rev Public Health*, 1994, 15: 107-132.
- [4] Menon S, Hansen J E, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, 297: 2250-2253.
- [5] Chu P C, Chen Y, Lu S, *et al.* Particulate air pollution in Lanzhou, China [J]. *Environ Int*, 2008, 34: 698-713.
- [6] 陈长和,黄建国,程麟生,等. 复杂地形上大气边界层和大气扩散的研究[M]. 北京:气象出版社,1993. 1-213.
- [7] 张强. 兰州大气污染物浓度与局地气候环境因子的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(1): 99-106.
- [8] 胡隐樵,张强. 兰州山谷大气污染的物理机制与防治对策[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 119-122.
- [9] 夏敦胜,余晔,马剑英,等. 兰州市街道尘埃磁学特征及其环境意义[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 937-944.
- [10] Wang S G, Feng X Y, Zeng X Q, *et al.* A study on variations of concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China [J]. *Atmos Environ*, 2009, 43: 2823-2828.
- [11] 张宁,李利平,王式功,等. 兰州市城区与背景点冬季大气气溶胶中主要无机离子的组成特征[J]. 环境化学, 2008, 27(4): 494-498.
- [12] 田森学,周伶芝,王瑞,等. 兰州市气溶胶中金属与非金属元素的污染规律[J]. 中国环境监测, 2001, 17(7): 18-22.
- [13] Wang S G, Yuan W, Shang K Z. The impacts of different kinds of dust events on PM₁₀ pollution in northern China [J]. *Atmos Environ*, 2006, 40(40): 7975-7982.
- [14] 王式功,杨昆,祁斌,等. 甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 354-358.
- [15] 陶健红,黄玉霞,陆登荣. 河西走廊沙尘活动对兰州 PM₁₀ 浓度的影响及其评估[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 272-276.
- [16] 王式功,姜大膀,杨德保,等. 兰州市区最大湿合层厚度变化特征分析[J]. 高原气象, 2000, 19(3): 363-370.
- [17] 尚可政,达存莹,付有智,等. 兰州城区稳定层及其与空气污染的关系[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 76-81.
- [18] Rao S T, Zurbenko I C, Neagu R, *et al.* Space and time scales in ambient ozone data [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1997, 78(10): 2153-2166.
- [19] Wise E K, Comrie A C. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States [J]. *Atmos Environ*, 2005, 39(16): 2969-2980.
- [20] Kuebler J, van den Bergh H, Russell A G. Long-term trends of primary and secondary pollutant concentrations in Switzerland and their response to emission controls and economic changes [J]. *Atmos Environ*, 2001, 35: 1351-1363.
- [21] Mayera H, Holsta J, Schindlers D, *et al.* Evolution of the air pollution in SW Germany evaluated by the long-term air quality index LAQx [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42: 5071-5078.
- [22] Wang Y, Hao J, McElroy M B, *et al.* Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics—effectiveness of emission restrictions [J]. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2009, 9: 9927-9959.
- [23] Gurjar B R, Butler T M, Lawrence M G, *et al.* Evaluation of emissions and air quality in megacities [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42: 1593-1606.
- [24] Zurbenko I. Spectral analysis of nonstationary time series [J]. *Int Stat Rev*, 1991, 59(2): 163-173.
- [25] 邱玉琨,牛生杰,沈建国. 内蒙古沙地和草地环境下近地面 PM₁₀ 分布特征及其与相关气象要素的关系[J]. 气候与环境研究, 2009, 14(1): 97-104.
- [26] 董雪玲,刘大猛,袁杨森,等. 北京市 2005 年夏季大气颗粒物污染特征及影响因素[J]. 环境工程学报, 2007, 1(9): 100-104.
- [27] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* [M]. USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [28] Zhang X Y, Gong S L, Shen Z X, *et al.* Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 1. Network observations [J]. *J Geophys Res-Atmos*, 2003, 108(D9): 4261.
- [29] Wang S G, Wang J Y, Zhou Z J, *et al.* Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China [J]. *Atmos Environ*, 2005, 39(3): 509-520.
- [30] 尉元明,潘峰,王静,等. 兰州城区 TSP 高浓度污染与自然降尘的关系[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 763-766.
- [31] 姜大膀,王式功,郎威梅,等. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2001, 37(4): 135-139.
- [32] Bi X, Feng Y, Wu J, *et al.* Source apportionment of PM₁₀ in six cities of northern China [J]. *Atmos Environ*, 2007, 41: 903-912.
- [33] 张宁,张武平,张萌. 沙尘暴降尘对甘肃大气环境背景值的影响研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 6-10.