

2007~2016 年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析

郑庆锋¹ 史军² 谈建国¹ 段玉森³ 林燕芬³ 徐卫忠¹

(1. 上海市气候中心上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030; 2. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;
3. 上海市环境监测中心, 上海 200030)

【摘要】基于上海地区 2006~2016 年逐日 PM_{10} 浓度数据以及同期气象要素(风、气温等)、大气稳定度、逆温数据和高空大气环流数据, 分析了 2007~2016 年上海地区颗粒物浓度变化特征和冬季气候背景的异同, 并建立多元线性逐步回归方程, 同时选取颗粒物高浓度年份和低浓度年份, 对比分析高空大气环流形势的差异。结果表明, 上海地区颗粒物年平均浓度呈现波动式下降趋势, 而冬季呈现出两头高、中间低形态。 PM_{10} 与平均风速、20:00 混合层高度负相关, 与偏西北风、20:00 稳定类、20:00 逆温的出现频率及平均气温正相关。当冬季我国北部 500hPa 高度场合成为正距平, 容易形成暖冬, 从而引起高浓度颗粒物污染; 而当 500hPa 高度场为负距平, 容易引起冷空气频繁南下, 导致气温偏低, 容易造成 PM_{10} 浓度相对偏低。850hPa 风场异常为偏东风, 且风速偏大, 容易造成 PM_{10} 浓度相对偏低。

【关键词】高浓度污染; 气候背景; 异同; 大气环流; 上海

Characteristics of Particulate Concentration and Their Climate Background in Shanghai During 2007–2016

ZHENG Qing-feng¹, SHI Jun², TAN Jian-guo¹, DUAN Yu-sen³, LIN Yan-fen³, XU
Wei-zhong¹

(1.Key Laboratory of Cities Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China; 2.Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China)

【Abstract】Based on daily PM_{10} concentration data from 2006 to 2016 in Shanghai and the meteorological elements (wind and temperature) and upper atmosphere circulation data, the variation characteristics of particulate concentration in Shanghai during 2007–2016 and the winter climate background were analyzed, and the multivariate linear stepwise regression equation was established. Meanwhile, the differences of atmospheric circulation situation in upper atmosphere were compared and analyzed by selecting the year of

收稿日期: 2019-04-24; 修订日期: 2019-08-02

资助项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF201922)

作者简介: 郑庆锋 (1978~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为应用气象和环境评价, E-mail: zqf_23f@126.com

high concentration of particulate matter and the year of low concentration. The results indicate that the annual average concentration of particulate matter in Shanghai showed a wavy downward trend, while the trend of particulate matter in winter was high with two heads and low in the middle. PM_{10} was negatively correlated with the average wind speed and the mixing layer height at 20:00, and positively correlated with the frequency of northwest wind, the average temperature and the frequency of stable weathers and inversion at 20:00. When the anomaly of 500hPa height field in the northern part of China became positive anomaly in winter, it was easy to form warm winter and lead to high concentration of particulate matter pollution. When the 500hPa height field was negative anomaly, it is easy to cause cold air frequent southward, resulting in low temperature, which caused the PM_{10} concentration to be relatively low. The wind field of 850hPa was easterly, and the wind speed is too large, which caused the PM_{10} concentration to be relatively low.

【Key words】high concentration pollution; climatic background; similarities and differences; atmospheric circulation; Shanghai

伴随着城市化快速发展,我国城市环境污染问题日益严重,特别是大气环境污染,与极端高温、城市热岛效应叠加对城市居民生产、生活以及人体健康造成很大的影响[1, 2]。近年来,颗粒物污染已成为中国大部分城市面临的主要大气污染问题[3]。各地极端大气污染事件频繁发生,对颗粒物的相关研究已经成为热点问题之一[4~8]。

针对京津冀地区、长三角地区和四川盆地,围绕大气颗粒物污染和气象要素的关系已开展了一系列研究,文献[9~14]分别对北京、天津、南京、上海和成都的颗粒物污染特征及与气象条件的关系进行了研究,结果表明颗粒物浓度与气温、相对湿度呈正相关,与风速呈负相关,当冬季气压场均匀时,长三角地区的大气污染最为严重[15]; Ma 等[6]分析了 2014~2016 年长三角地区大气污染特征及其与排放和气象的关系,结果表明气象条件主要影响污染物浓度的日变化, $PM_{2.5}$ 浓度与风速呈负相关, PM_{10} 浓度与温度呈正相关,与相对湿度呈负相关; He 等[16]分析了 2014~2015 年中国 31 个省会城市的空气污染特征及其与多尺度气象条件的关系,表明气象条件是决定污染物浓度日变化的主要因素,占全国污染物日平均浓度变化的 70%以上。

从天气学方面进行颗粒物污染气象特征研究,也有研究表明 500hPa 环流形势中两槽一脊型和槽脊同位相型控制下的空气质量最差[17, 18]; 文献[19~23]则基于 WRF/Chem 模式,对颗粒物进行数值模拟研究。然而,以上研究大多是一次污染过程或较短时间序列污染过程,利用较长时间序列的颗粒物浓度数据和气象数据对颗粒物污染的气候背景研究较少。He 等[24]分析了 1980~2017 年北京 38 个冬季的冬季环流类型及其对当地气象条件和雾、霾污染的影响,表明北京冬季雾、霾污染受到气候变化的影响,1980~2017 年 38 个冬季霾日数呈下降趋势,部分与冷空气频率呈上升趋势有关。苗蕾等[25]分析了北京 2005~2014 年 $PM_{2.5}$ 浓度日变化特征及气象条件影响。

本文利用上海 2006~2016 年上海逐日 PM_{10} 浓度数据,以及同期地面观测的气象资料和探空资料,研究影响颗粒物浓度的气候背景,以期科学评价天气、气候条件变化对颗粒物污染发生的影响、提高污染性天气预报的准确率和合理控制、减少大气污染的危害提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 数据资料

本文 PM_{10} 浓度数据资料来自上海市环境监测中心提供的资料,资料时间序列为 2006~2016 年逐日数据。气象资料(包括地面资料及探空资料)来自于上海市气象信息与技术支撑中心的宝山国家基本气象站(站号 58362, $121^{\circ} 27' E$, $31^{\circ} 24' N$)逐日观测资料,其中探空资料取自逐日北京时 08:00 和 20:00 探测资料,统计时间段都为 2006~2016 年,统计要素有地面层风速、风向、气温、规定层和特征层的气压、高度和气温等。此外,文中还利用大气环流资料,来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA, <https://www.esrl.noaa.gov/>)。

1.2 分析方法

时间序列分析方法采用 ARMA (p, q) 模型, 其全称为自回归移动平均模型 (auto-regressive moving average model, ARMA), 其中 p 为自回归项, q 为移动平均项数。ARMA (p, q) 由自回归模型 AR 和移动平均模型 MA 模型组成, 计算公式如下:

$$y_t = \mu + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \epsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \epsilon_{t-i}$$

式中, y_t 表示当前值, μ 表示常数项, p 表示自回归阶数, q 表示移动平均阶数, φ_i , θ_i 表示相关系数, ϵ_t 表示误差。

数据的平稳性单位根检验用增广迪基-福勒检验 (augmented dickey-fuller test, ADF)。

线性相关系数用 r 表示, 计算公式如下:

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var[X]Var[Y]}}$$

式中, $Cov(X, Y)$ 为 X 与 Y 的协方差, $Var[X]$ 为 X 的方差, $Var[Y]$ 为 Y 的方差。

多元线性回归方程方法:

设因变量 y 与自变量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 有线性关系, 那么建立 y 的 m 元线性回归模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m + \epsilon$$

式中, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 为回归系数; ϵ 是遵从正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 的随机误差。

由观测值确定回归系数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 的估计 $b_0, b_1, \dots, b_m$, 得到 y_t 对 $x_0, x_1, \dots, x_m$ 的线性回归方程:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_m x_m + \epsilon$$

式中, $\hat{y}$ 表示 y 的估计; ϵ 是残差。

大气稳定度按照帕斯奎尔-特纳大气稳定度分类方法统计, 混合层高度按照《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GB/T3094-91) 规定的方法计算。

2 结果与分析

2.1 颗粒物浓度变化特征

2.1.1 年平均浓度变化特征

2007~2016 年间, 上海 PM₁₀ 年平均浓度呈现波动式下降趋势, 2007 年最高 (98.3 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 2016 年最低 (77.1 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); 冬季 PM₁₀ 平均浓度呈现两头高、中间低形态, 其中 2007 年最高 (125.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 2012 年最低 (79.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 具体见图 1。

图 1 显示, 除了 2012 年, 冬季平均浓度都远高于全年平均浓度, 最多高出达 42.6%。2012 年冬季平均浓度略低于全年平均浓度, 其主要原因是 2012 年冬季气温偏低、冬北风异常偏多引起的。

尹晓梅等[26]的研究表明, 2017 年北京地区减少的霾日和重污染日, 65% 归因于减排的贡献, 35% 归因为气象条件的改善。李颖若[27]等的研究表明 2014 年 APEC 控制期采取控制措施使得北京地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度分别降低 34.8% 和 40.6%, 气象因素使得 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度分别降低 27.5% 和 35.6%。Wang 等[28]的研究表明中国在 2014 年和 2015 年减排有效地减少了 PM_{2.5} 浓度 23.9 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 43.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。Ma 等[6]的研究表明, 2014~2016 年, 长三角地区 PM_{2.5}、PM₁₀ 排放量分别下降 26.3% 和 29.2%。于燕等[29]的研究表明, 在一般与强化两组减排情景下, 长三角地区国控点 PM_{2.5} 年均浓度分别下降 1.4~26.7 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 2.1~32.3 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。卢文等[30]的研究表明南京 PM_{2.5} 年平均浓度由 2014 年的 62.1 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 2016 年的 51.2 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。近年来空气质量的改善主要归功于减排, 减排和区域联防联控有助于改善当地的空气质量, 这和图 1 中显示 2014~2016 年 PM₁₀ 年平均浓度值减小的结论是一致的。

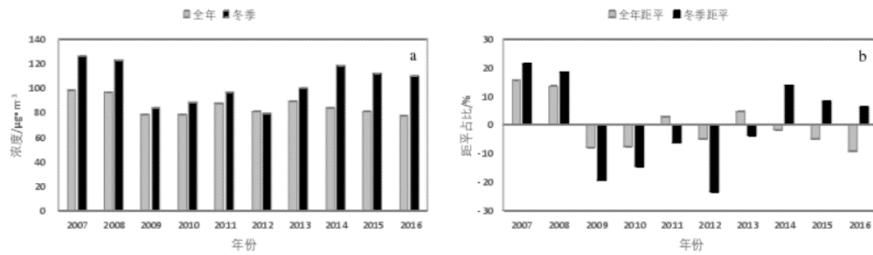


图 1 2007~2016 年上海地区全年和冬季 PM₁₀ 浓度年变化及距平

Fig.1 Annual and winter variations and anomaly of PM₁₀ concentrations in Shanghai during 2007-2016

2.1.2 月平均浓度变化特征

利用时间序列分析方法对 PM₁₀ 月平均浓度变化趋势进行分析, 结果见图 2, 2007~2016 年, 上海 PM₁₀ 月平均浓度具有明显的周期性, 四季平均浓度高低顺序为冬季>春季>秋季>夏季。其中滑动平均值和滑动标准差的滑动窗口值为 12。ADF 平稳性检验结果为: P 值 (0.166) 大于 0.05, 检测值 (-2.319) 大于 5%时置信度下的临界值 (-2.889), 没有通过 ADF 平稳性检验。

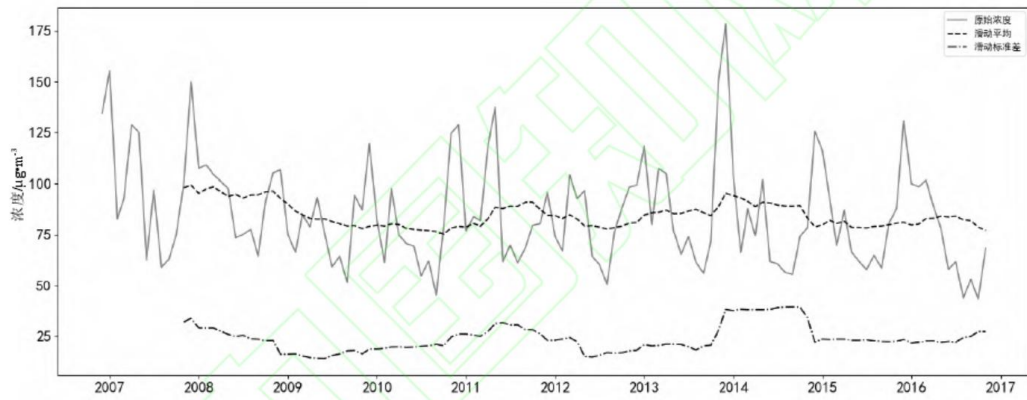


图 2 2007~2016 年上海地区 PM₁₀ 月平均浓度变化趋势

Fig.2 Trend of monthly mean concentration of PM₁₀ in Shanghai during 2007-2016

而平稳性是时间序列分析的前提条件, 对原始浓度进行分解, 拆分成趋势、季节和残值这 3 部份, 如图 3 所示, PM₁₀ 月平均浓度趋势部分呈现波动式下降趋势, 季节部分周期性明显。对残值进行 ADF 平稳性检验, 结果显示: P 值 (3.457×10^{-7}) 远小于 0.01, 检测值 (-5.858) 小于 1%时置信度下的临界值 (-3.500), 通过 ADF 平稳性检验。在 99%的置信度下, Residuals 数据是稳定的, 其均值和方差均趋于常数 (图略)。

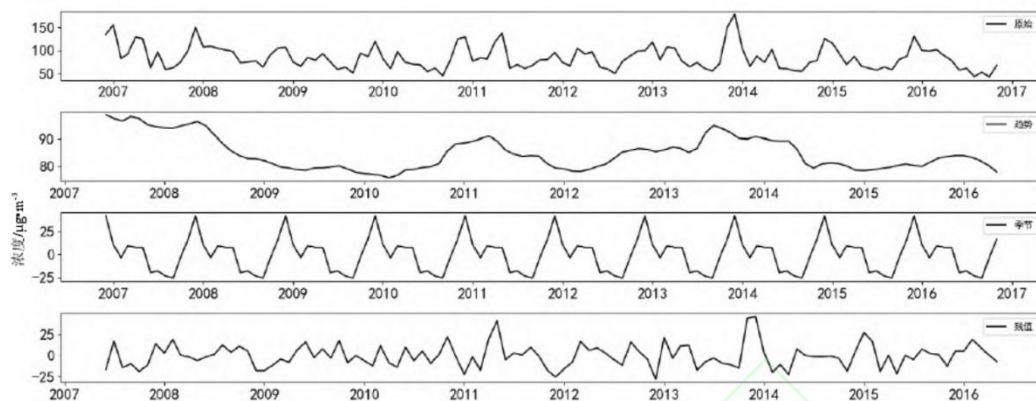


图 3 2007~2016 年上海地区 PM₁₀ 月平均浓度分解后变化趋势

Fig.3 Trend of monthly mean concentration of PM₁₀ after decomposition in Shanghai during 2007-2016

2.2 冬季颗粒物污染的总体气候背景

对冬季 PM10 浓度偏高年份（2007~2008 年和 2014~2016 年）、偏低年份（2009~2013 年）、最高年份（2007 年）和最低年份（2012 年）的气象条件分析结果见表 1，总体上，浓度偏高年份伴随着污染日数明显偏多，同期平均风速偏小、小风日数偏多、静风出现频率偏高，20:00 稳定类日数和逆温日数偏多而混合层高度偏低，平均气温偏高。

表 1 颗粒物浓度偏高、偏低、最高、最低年份气象条件对比

Table 1 Meteorological condition between high and low concentration of particulate matter					
气象要素	偏高年份 (2007~2008 年和 2014~2016 年)	偏低年份 (2009~2013 年)	最高年份 (2007 年)	最低年份 (2012 年)	10a 平均
平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	117.6	89.5	125.7	79.2	103.6
污染日数/d	21.8	12.2	23	5	17.0
平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.58	2.73	2.69	2.66	2.65
$\leq 1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 小风日数/d	13.4	7.2	9	7	10.3
20:00 稳定类日数/d	63.6	57.4	58	57	60.5
20:00 混合层高度/m	284.2	322.5	322.3	320.0	303.4
20:00 逆温日数/d	16.4	10.4	13	4	13.4
平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	6.47	5.85	7.67	5.22	6.16

2.2.1 风

风是影响大气污染物扩散、稀释的最重要的一个因子，风速的大小决定着大气污染物的扩散速率，而风向则决定着大气污染物的落区。图 4 显示，2007~2016 年冬季平均风速呈现减少趋势，尤其是近 3 年（2014~2016 年）减少比较明显，各年冬季 PM10 浓度和风速去趋势项后呈现负相关（ $r=-0.62$ ），这与许文轩等[31]和贾梦唯等[32]的研究结论一致。

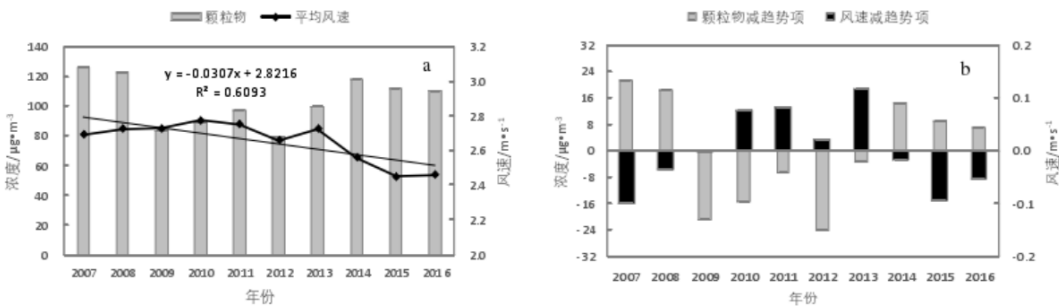


图 4 2007~2016 年上海地区冬季风速年变化

Fig.4 Winter variations of wind speed in Shanghai during 2007-2016

图 5 显示，PM10 浓度偏高年份，偏西北风（NW、NNW、WNW）或静风（C）出现频率明显偏大，偏西北风、静风出现频率和 PM10 浓度呈现正相关（ r 分别为 0.629 和 0.474）。2012 年冬季东北风异常偏多，风速偏大是造成当年冬季平均浓度略低于全年平均浓度的主要原因之一（图 6）。

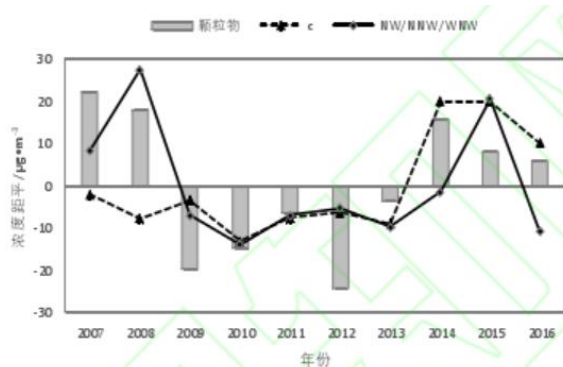


图 5 2007~2016 年上海地区冬季风向出现频率距平年变化

Fig.5 Winter variations and anomaly of wind direction in Shanghai during 2007-2016

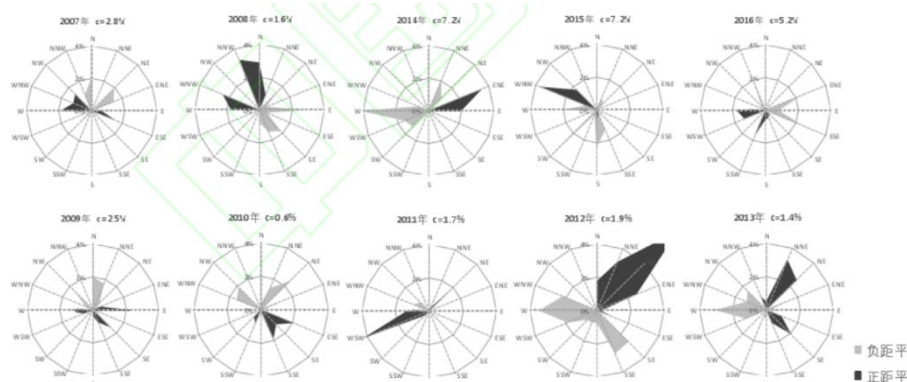


图 6 2007~2016 年上海地区冬季风玫瑰图

Fig.6 Wind rose map in winter in Shanghai during 2007-2016

2.2.2 气温和逆温

2007~2016 年，冬季平均气温呈现波动式下降趋势[图 7 (a)]，20:00 逆温出现日数呈波动式增加趋势[图 7 (b)]。去趋势项后平均气温和 PM10 浓度呈正相关 ($r=0.461$)，这与赵晨曦[9]等研究结论一致。去趋势项后 20:00 逆温和 PM10 浓度呈正相关 ($r=0.402$)。

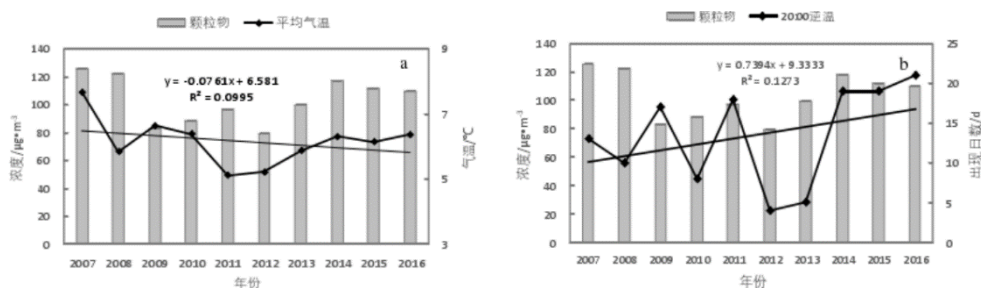


图 7 2007~2016 年冬季平均气温和 20:00 逆温年变化

Fig.7 Winter variations of air temperature and 20:00 temperature inversion in Shanghai during 2007-2016

2.2.3 大气稳定性和混合层高度

对 2007~2016 年冬季 02:00、08:00、14:00 和 20:00 大气稳定性、混合层高度与 PM10 浓度相关性分析表明，20:00 大气稳定性、混合层高度和 PM10 浓度关系最密切 (图 8)，冬季 20:00 大气稳定性都以稳定类为主 (61.1%~75.6%)，中性次多，不稳定类没有出现。20:00 稳定类出现频率呈增长趋势，和 PM10 浓度去趋势项后呈正相关 ($r=0.647$)，20:00 混合层高度呈波动式下降趋势，和 PM10 浓度去趋势项后呈负相关 ($r=-0.462$)。

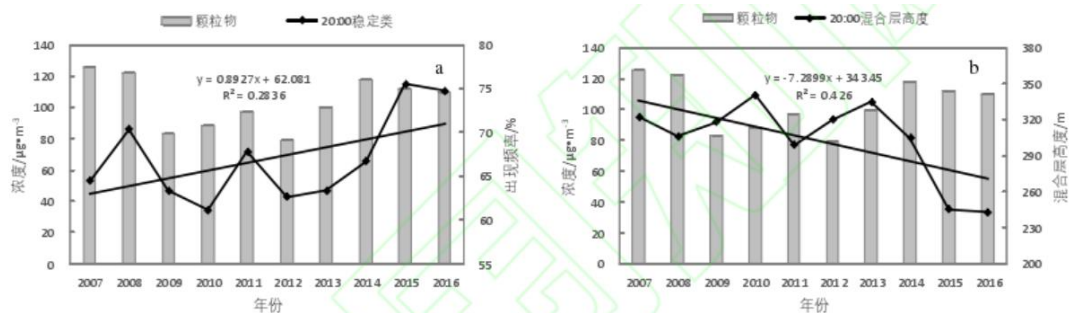


图 8 2007~2016 年冬季 20:00 大气稳定性和混合层高度年变化

Fig.8 Winter variations of atmospheric stability and 20:00 mixing layer height in Shanghai during 2007-2016

去趋势项后 PM_{10} 和各气象要素的相关系数见表 2。

表 2 去趋势项后 PM_{10} 和各气象要素相关系数汇总

Table 2 Correlation coefficient between PM_{10} and meteorological elements after decreasing trend item

项目	风速	偏西北风	气温	20:00 稳定类	20:00 混合层高度	20:00 逆温
r	-0.620	0.629	0.461	0.647	-0.462	0.402

2.2.4 与气象要素的拟合关系

选取冬季地面气象要素（风速和气温等），08:00 和 20:00 的高空气象要素（1000、925、850、700 和 500hPa 高度的温度、露点温度和风速风向）以及 20:00 混合层高度等共 66 个因子和 PM_{10} 日均浓度利用 matlab2014 软件进行多元线性逐步回归分析，样本数共 842 个，得出回归方程如下：

$$y = 100.116 + 0.4462 \times y_1 - 0.03631 \times x_1 - 0.3418 \times x_2 + 1.6378 \times x_3 - 5.1369 \times x_4 + 1.5170 \times x_5 - 4.0402 \times x_6 - 1.1098 \times x_7 + 5.3347 \times x_8$$

式中， y 表示 PM_{10} 的日平均浓度， $\mu g \cdot m^{-3}$ ； y_1 表示前一天 PM_{10} 的日平均浓度， $\mu g \cdot m^{-3}$ ； x_1 表示 20:00 混合层高度，m； x_2 表示日最高气温， $^{\circ}C$ ； x_3 和 x_4 表示 925hPa08:00 风速和 1000hPa20:00 风速的垂直方向矢量， $m \cdot s^{-1}$ ； x_5 和 x_6 表示 925hPa 和 1000hPa20:00 风速的水平方向矢量， $m \cdot s^{-1}$ ； x_7 表示 700hPa 与 500hPa20:00 温度差， $^{\circ}C$ ； x_8 表示 1000hPa20:00 温度， $^{\circ}C$ 。

根据回归方程，计算 PM_{10} 日均浓度，和 PM_{10} 实测值进行相关分析（图 9），结果显示 $r=0.696$ ，满足显著性水平（ $\alpha=0.01$ ），拟合效果较好。

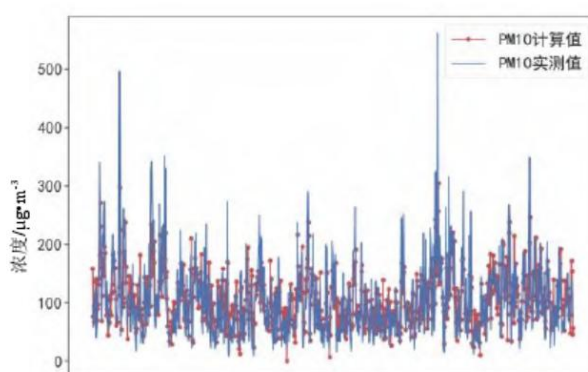


图 9 冬季 PM_{10} 日平均浓度逐步回归方程回代检验分析

Fig.9 Regression test analysis of the concentration of PM_{10} in winter by stepwise regression equation

2.3 冬季大气环流形势

对 2007~2016 年冬季 PM₁₀ 浓度偏高年份、偏低年份、最高年份和最低年份的 500hPa 高度场和 850hPa 风场分析表明, PM₁₀ 浓度偏高年份冬季, 我国北部 500hPa 高度场为正距平[图 10 (a)], 上海地区容易形成暖冬, 从而引起高浓度 PM₁₀ 污染; 而 PM₁₀ 浓度偏低年份冬季, 我国北部 500hPa 高度场为负距平[图 10 (b)], 容易引起冷空气频繁南下, 造成上海地区温度偏低, 导致 PM₁₀ 浓度相对偏低。

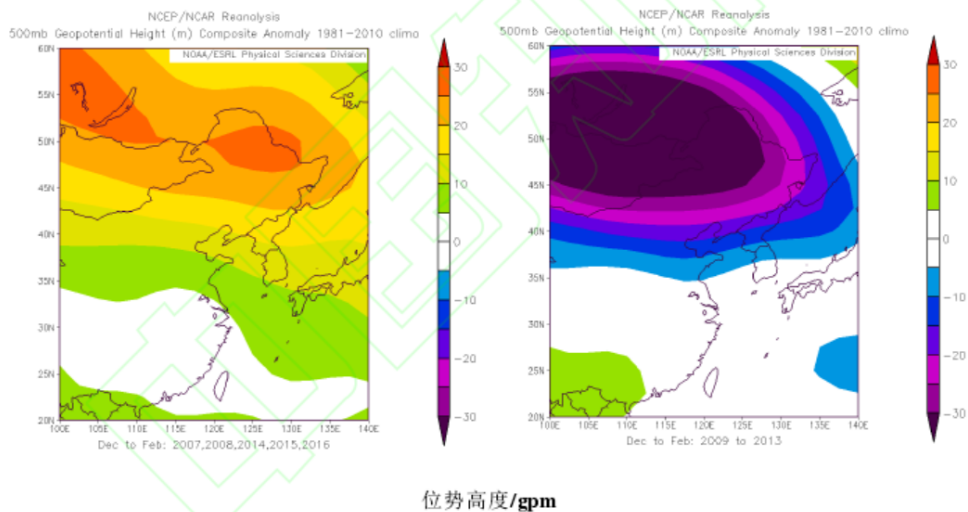


图 10 上海地区冬季 PM₁₀ 浓度偏高偏低年份合成 500hPa 高度场异常对比

Fig.10 500hPa geopotential height anomaly synthesis in the high PM₁₀ concentration year and low PM₁₀ concentration year

图 11 显示, PM₁₀ 浓度偏高年份, 上海地区冬季 850hPa 风场异常为东风, PM₁₀ 浓度偏低年份风场异常为南风, 偏低年份风速相比偏高年份偏大, 这和前文风速和 PM₁₀ 浓度负相关的结论是一致的。

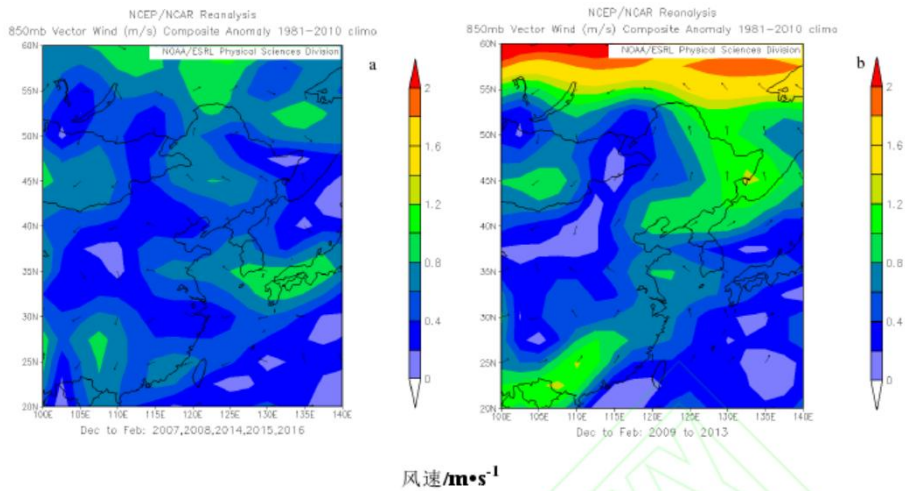


图 11 上海地区冬季 PM₁₀ 浓度偏高偏低年份合成 850hPa 风场异常对比

Fig.11 850hPa wind field anomaly synthesis in the high PM₁₀ concentration year and low PM₁₀ concentration year

2007 年冬季我国北部 500hPa 高度场为正距平, 容易形成暖冬, 从而引起 PM₁₀ 污染加重, 而 2012 年冬季我国北部 500hPa 高度场为负距平 (图略), 容易引起冷空气频繁南下, 造成上海地区温度偏低, 导致 PM₁₀ 浓度相对偏低。2007 年冬季上海地区 850hPa 风场异常为东南风, 2012 年冬季风场异常为东风, 2012 年风速明显比 2007 年大 (图略), 这有利于 PM₁₀ 污染物扩散, 风速偏大也是 2012 年冬季 PM₁₀ 浓度相对偏低的重要原因之一。

3 结论

(1) 2007~2016 年 PM₁₀ 年平均浓度呈现波动式下降趋势, 冬季 PM₁₀ 平均浓度呈现两头高、中间低形态; 除了 2012 年, 冬季平均浓度都远高于全年平均浓度。PM₁₀ 月平均浓度趋势部分呈现波动式下降趋势, 季节部分周期性明显, 残值通过 ADF 平稳性检验, 检测值 (-5.858) 小于 1% 置信度下的临界值 (-3.500)。

(2) 去趋势项后 PM₁₀ 与平均风速、20:00 混合层高度负相关 (r 为 -0.620 和 -0.462), 与偏西北风出现频率、20:00 稳定类出现频率、20:00 逆温出现频率、平均气温正相关 (r 为 0.629、0.647、0.402 和 0.461)。建立多元逐步线性回归方程并回代检验分析, $r=0.696$, 满足显著性水平 ($\alpha=0.01$)。

(3) 当冬季我国北部 500hPa 高度场为正距平, 容易引起高浓度 PM₁₀ 污染; 而当冬季我国北部 500hPa 高度场为负距平, 容易导致 PM₁₀ 浓度相对偏低。850hPa 风场异常为偏东风, 且风速偏大, 容易造成 PM₁₀ 浓度相对偏低。2012 年冬季气温偏低、偏东风异常偏多, 风速偏大是造成当年冬季平均浓度略低于全年平均浓度的主要原因。

致谢: 感谢美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的资料。

参考文献:

- [1] Tsangari H, Paschalidou A K, Kassomenos A P, et al. Extreme weather and air pollution effects on cardiovascular and respiratory hospital admissions in Cyprus[J]. Science of the Total Environment, 2016,542:247-253.
- [2] O'Lenick C R, Wilhelmi O V, Michael R, et al. Urban heat and air pollution: A framework for integrating population vulnerability and indoor exposure in health risk analyses[J]. Science of the Total Environment, 2019,660:715-723.
- [3] Xiao Y L, Hong Q S, Shi Y Z, et al. Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015-2017) [J]. Environmental Pollution, 2019, 246:11-18.
- [4] Whiteman C D, Hoch S W, Horel J D, et al. Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley[J]. Atmospheric Environment, 2014,94:742-753.
- [5] Wang J Z, Zhang X Y, Li D, et al. Interdecadal changes of summer aerosol pollution in the Yangtze River Basin of China, the relative influence of meteorological conditions and the relation to climate change[J]. Science of the Total Environment, 2018,630:46-52.
- [6] Ma T, Duan F K, He K B, et al. Air pollution characteristics and their relationship with emissions and meteorology in the Yangtze River Delta region during 2014-2016[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019,83:8-20.
- [7] Yin F, Ma Y, Zhao X, et al. Analysis of the effect of PM₁₀ on hand, foot and mouth disease in a basin terrain city[J]. Scientific Reports, 2019, 9:3233.
- [8] Wu X C, Chen B, Wen T X, et al. Concentrations and chemical compositions of PM₁₀ during hazy and non-hazy days in Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 87:1-9.
- [9] 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等.北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J].环境科学, 2014,35(2):418-427.
- Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. Environmental Science, 2014,35(2):418-427.
- [10] 杨志文,元洁,吴琳,等.2015 年 2 月天津市大气颗粒物数浓度变化及其与气象条件的关系[J].环境工程学报, 2017,11(7):4125-4132.
- Yang Z W, Yuan J, Wu L, et al. Characteristics of particle number concentration during February in 2015 in Tianjin and their relationship with meteorological conditions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(7):4125-4132.
- [11] 花艳,潘良宝,汤莉莉,等.南京霾天颗粒物数浓度特征及其受气象条件影响分析[J].气象科学, 2017,37(3):385-393.
- Hua Y, Pan L B, Tang L L, et al. Characteristics of the particulate number concentration and association with meteorological conditions during winter haze episode in Nanjing[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2017,37(3):385-393.
- [12] 陈镭,马井会,甄新蓉,等.上海地区空气污染变化特征及其气象影响因素[J].气象与环境学报, 2017, 33(3):59-67.

- Chen L, Ma J H, Zhen X R, et al. Variation characteristics and meteorological influencing factors of air pollution in Shanghai[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(3):59-67.
- [13] 孙欢欢,倪长健,崔蕾,等.成都市大气颗粒物污染特征及与气象因子的关联性分析[J].环境防治与污染,2016,38(5):55-60.
- Sun H H, Ni C J, Cui L, et al. Pollution characteristics of atmospheric particles and their correlation with meteorological factors in Chengdu City[J]. Environmental Pollution Control,2016,38(5):55-60.
- [14]刘凡,谭钦文,江霞,等.成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响[J].环境科学,2018,39(4):1466-1472.
- Liu F, Tan Q W, Jiang X, et al. Effect of relative humidity on particulate matter concentration and visibility during winter in Chengdu[J]. Environmental Science, 2018,39(4):1466-1472.
- [15] Hou X W, Zhu B, Kanike R K, et al. Inter-annual variability in fine particulate matter pollution over China during 2013-2018: Role of meteorology[J]. Atmospheric Environment, 2019, 214:116842.
- [16] He J J, Gong S L, Yu Y, et al. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2017,223:484-496.
- [17] 蒋伊蓉,朱蓉,朱克云,等.京津冀地区重污染天气过程的污染气象条件数值模拟研究[J].环境科学学报,2015,35(9):2681-2692.
- Jiang Y R, Zhu R, Zhu K Y, et al. Numerical simulation on the air pollution potential in the severe air pollution episodes in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015,35(9):2681-2692.
- [18]曾胜兰,王雅芳.成都地区污染天气分型及其污染气象特征研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(Z1):59-67.
- Zeng S L, Wang Y F. Researches of weather pattern and pollution meteorological characteristics in Chengdu area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2016,25(Z1):59-67.
- [19]常炉予,许建明,周广强,等.上海典型持续性 PM_{2.5} 重度污染的数值模拟[J].环境科学,2016,37(3):825-833.
- Chang L Y, Xu J M, Zhou G Q, et al. A numerical study of typical heavy air pollution episode of PM_{2.5} in Shanghai[J]. Environmental Science, 2016,37(3):825-833.
- [20]刘琳,王玲玲,白永清,等.应用 WRF/Chem 模拟河南冬季大气颗粒物的区域输送特征[J].环境科学学报,2017,37(5):1843-1854.
- Liu L, Wang L L, Bai Y Q, et al. Simulation for the impacts of regional transport on winter particulate matter levels over Henan based on WRF /Chem model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2017,37(5):1843-1854.
- [21]张晗宇,程水源,姚森,等.2016 年 10~11 月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律[J].环境科学,2019,40(5):1999-2009.
- Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, et al. Pollution characteristics and regional transport of atmospheric particulate matter in Beijing from October to November,2016, [J]. Environmental Science, 2019,40(5):1999-2009.
- [22]王涛,李杰,王威,等.北京秋冬季一次重污染过程 PM_{2.5} 来源数值模拟研究[J].环境科学学报,2019,39(4):1025-1038.
- Wang T, Li J, Wang W, et al. Numerical simulation study on source apportionment of PM_{2.5} in a heavy winter pollution event over Beijing area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2019,39(4):1025-1038.
- [23]徐冉,张恒德,杨孝文,等.北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J].环境科学,2019,40(8):3405-3414.
- Xu R, Zhang H D, Yang X W, et al. Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019,40(8):3405-3414.
- [24] He J J, Gong S L, Zhou C H, et al. Analyses of winter circulation types and their impacts on haze pollution in Beijing. Atmospheric Environment 2018,192:94-103.
- [25]苗蕾,廖晓农,王迎春.基于长时间序列的北京 PM_{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析[J].环境科学,2016,37(8):2836-2846.
- Miao L, Liao X N, Wang Y C, et al. Diurnal variation of PM_{2.5} mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term date [J]. Environmental Science, 2016,37(8):2836-2846.
- [26]尹晓梅,李梓铭,熊亚军,等.2014~2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J].环境科学,2019,40(3):1011-1023.

- Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, et al. Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017[J]. *Environmental Science*, 2019,40(3):1011-1023.
- [27]李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 等. 利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响 [J]. *环境科学*, 2019,40(3):1024-1034.
- Li YR, Wang J X, Han T T, et al. Using multiple linear regression method to evaluate the impact of meteorological conditions and control measures on air quality in Beijing during APEC 2014 [J]. *Environmental Science*, 2019,40(3): 1024-1034.
- [28] Wang P F, Guo H, Hu J L, et al. Responses of PM_{2.5} and O₃ concentrations to changes of meteorology and emissions in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,662: 297-306.
- [29]于燕,王泽华,崔雪冬,等.长三角地区重点源减排对 PM_{2.5} 浓度的影响[J].*环境科学*,2019,40(1):12-23.
- Yu Y, Wang Z H, Cui X D, et al. Effects of emission reductions of key sources on the PM_{2.5} concentrations in the Yangtze river delta[J]. *Environmental Science*, 2019,40(1):12-23.
- [30] 卢文,王红磊,朱彬,等.南京江北 2014~2016 年 PM_{2.5} 质量浓度分布特征及气象和传输影响因素分析[J].*环境科学学报*,2019,39(4):1039-1048.
- Lu W, Wang H L, Zhu B, et al. Distribution characteristics of PM_{2.5} mass concentration and their impacting factors including meteorology and transmission in North Suburb of Nanjing during 2014 to 2016[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019,39(4): 1039-1048.
- [31]许文轩,田永中,肖悦,等.华北地区空气质量空间分布特征及成因研究[J].*环境科学学报*,2017,37(8):3085-3096.
- Xu W X, Tian Y Z, Xiao Y, et al. Study on the spatial distribution characteristics and the drivers of AQI in North China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2017,37(8):3085-3096.
- [32]贾梦唯,赵天良,张祥志,等.南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析[J].*中国环境科学*,2016,36(9):2567-2577.
- Jia M W, Zhao T L, Zhang X Z, et al. Seasonal variations in major air pollutants in Nanjing and their meteorological correlation analyses[J]. *China Environmental Science*, 2016,36(9):2567-2577.