

赵域圻, 杨婷, 王自发, 等. 2020. 基于 KZ 滤波的京津冀 2013~2018 年大气污染治理效果分析 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 499-509. ZHAO Yuqi, YANG Ting, WANG Zifa, et al. 2020. Effectiveness of Air Pollution Control Efforts in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 2013-2018 Based on the Kolmogorov-Zurbenko Filter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 499-509. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19094

基于 KZ 滤波的京津冀 2013 ~ 2018 年 大气污染治理效果分析

赵域圻^{1,2} 杨婷¹ 王自发¹ 何立涛³ 吴林¹ 崔延斌³

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 衡水市生态环境局, 河北衡水 053000

摘要 通过国务院“大气十条”等严格的大气污染治理措施的实施, 近年来我国空气质量得到全面改善。对大气污染治理效果开展科学分析研究, 可为后续空气质量持续改善、污染科学精准治理提供有效科技支撑。由于气象条件是影响污染物浓度分布的重要因素, 治理效果分析的一个重要问题是区分气象条件和减排措施对污染物浓度变化的具体贡献。本文利用京津冀地区 13 个城市 2013~2018 年 86 个监测站点逐日 PM_{2.5} 浓度以及欧洲中期气象预报中心 (ECMWF) 气象再分析资料, 采用 KZ (Kolmogorov-Zurbenko) 滤波分析 PM_{2.5} 浓度观测序列的时频特性, 将其分解为短期天气影响分量、中期季节变化分量以及长期趋势分量 3 个部分, 针对分解浓度序列建立气象因子回归模型, 实现定量评估气象和减排对治理效果的具体贡献。在研究时间段内, 京津冀地区 13 个城市 PM_{2.5} 浓度的长期分量显著下降 (22.2%~58.0%), 其中邢台市下降幅度最大 (58.0%)。整体分析表明, 气象条件和排放源均有利于大气污染的改善, 但减排措施是空气质量显著改善的决定性原因, 具体贡献为气象条件的影响占 18.5%, 排放源的影响占 81.5%。逐城分析表明, 唐山市的气象条件最有利于 PM_{2.5} 浓度的减小 (29.2%), 而衡水市的减排措施最有利于 PM_{2.5} 浓度的减小 (92.0%)。

关键词 KZ 滤波 PM_{2.5} 浓度 气象要素

文章编号 1006-9585(2020)05-0499-11

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19094

Effectiveness of Air Pollution Control Efforts in Beijing-Tianjin-Hebei Region during 2013-2018 Based on the Kolmogorov-Zurbenko Filter

ZHAO Yuqi^{1,2}, YANG Ting¹, WANG Zifa¹, HE Litao³, WU Lin¹, and CUI Yanbin³

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Hengshui City Environmental Protection Bureau, Hengshui, Hebei Province 053000

收稿日期 2019-06-17; 网络预出版日期 2020-03-20

作者简介 赵域圻, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气环境方向研究。E-mail: zhaoyuqi@mail.iap.ac.cn

通讯作者 杨婷, E-mail: tingyang@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) XDA19040203, 大气重污染成因与治理攻关项目 DQGG0209、DQGG0107、DQGG0304

Funded by Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (A) (Grant XDA19040203), National Research Project for Key Program Air Pollution Control, China (Grants DQGG0209, DQGG0107, and DQGG0304)

Abstract China's air quality has improved in recent years by the implementation of strict pollution control action plans such as the National "Ten Measures for Air" ratified by the Chinese State Council. To achieve sustained improvements in air quality and targeted pollution control in the coming years the effectiveness of these pollution control initiatives must be scientifically evaluated. Because air quality levels are strongly influenced and at times even dominated by meteorological conditions, a major difficulty of such analysis is quantifying the contributions of meteorological conditions and pollution control initiatives to variations in the respective pollutant concentrations. In this study, we assessed the effectiveness of pollution control efforts for one of the most heavily polluted areas in China—the Beijing–Tianjing–Heibei region—by analyzing (1) the time-frequency properties of the PM_{2.5} time series collected from 86 monitoring sites in 13 cities of this region during 2013–2018 and (2) the corresponding meteorological conditions retrieved from the reanalysis product of the European Center for Medium-range Weather Forecast (ECMWF). We used the Kolmogorov–Zurbenko filter to separate the original PM_{2.5} series into three components: Short-term weather-related variations, medium-term seasonal variations, and long-term trends. We constructed regression models to account for the influence of meteorological variables on the PM_{2.5} concentrations to distinguish their impacts on pollution abatement from those of the emission reduction actions. We found that during 2013–2018, the long-term trends of PM_{2.5} concentration over 13 cities decreased significantly (22.2%–58.0%), with Xingtai city experiencing the greatest decrease (58.0%). Both meteorological conditions and emission reduction actions contributed to the improvement of air quality, but emission reduction actions were the decisive factor in the significant improvement in air quality. The contributions of meteorological conditions and emission reduction actions were 18.5% and 81.5%, respectively. Among the 13 cities, the meteorological conditions were the most beneficial for Tangshan (29.2%) whereas emission reduction actions played the most important role for Hengshui (92.0%).

Keywords KZ filtering, PM_{2.5} concentration, Meteorological elements

1 引言

大气污染是我国前期高速发展模式下所长期累积的环境问题。大气细颗粒物 PM_{2.5} (动力学直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物) 是雾霾的首要污染物, 可危害人民健康, 如导致呼吸系统和心血管等疾病 (杨新兴等, 2012)。大气污染治理是我国生态文明建设的重要内容, 受国家与人民高度重视。近年来, 我国实施了国务院“大气十条”等严格的大气污染治理措施, 实现空气质量全面好转。为进一步改善我国空气质量, 需将大气污染治理推进到科学精准的新阶段。大气污染治理效果的科学评估是科学精准治理的重要内容, 对各级政府大气污染防治行动的审核奖惩和优化设计都具有重要的实际意义。

大气细颗粒物既可由人为活动的排放直接生成, 也可在大气中经由化学反应间接生成。PM_{2.5} 在大气中的物理传输、化学转化、发展消亡都离不开大气中各种气象要素的作用, 因而其浓度变化受气象条件深刻影响 (Leung et al., 2018)。在不利气象条件下, 如小风静稳天气、边界层逆温, 在高排放的城市群容易形成重污染事件 (Wang et al., 2018); 反之, 在有利气象条件下, 如大气扩散条件较好以

及风雨天气, 重污染事件则不易形成 (Shu et al., 2017)。长期的天气条件和气候变化, 比如静稳天气发生频次变化和气候变暖干湿变化, 也会对污染物浓度的时空分布产生影响 (Huang et al., 2018)。因此, 科学评估大气污染治理效果的首要问题, 是去除气象条件的影响来评估减排措施的长期作用, 区分气象条件和减排措施对污染物长期浓度变化的具体贡献 (Kuebler et al., 2001; Hogrefe et al., 2003; 余晔等, 2010)。

区分气象条件和减排措施对 PM_{2.5} 浓度变化贡献的方法可基于模式模拟实验或数理统计技术构建。模式模拟的方法 (张铨麟等, 2014; Zhong et al., 2018; Cheng et al., 2019) 受限于空气质量模式的性能、不准确的排放清单和气象条件、不完善的化学动力学机理及模式的强非线性等; 基于数理统计区分方法首先建立污染物浓度变化和各气象要素与源排放的统计模型, 然后据此统计模型量化气象条件和排放因素对污染物浓度变化的贡献 (Liang et al., 2016; Yang et al., 2017; Chen et al., 2018)。Rao and Zurbenko (1994) 提出的 KZ (Kolmogorov – Zurbenko) 滤波是一种利用污染物浓度变化的频域特性将浓度时间序列分解为不同时间尺度分量的技术, 可以分离出原始时间序列中的高频信号和低频

信号。利用 KZ 滤波去除气象影响的技术被广泛应用于研究 O_3 的控制效果评估研究中 (Flaum et al., 1996; Rao et al., 1997; Ibarra-Berastegi and Madariaga, 2003; Henneman et al., 2015; Ahmadi and John, 2015), 也有用于 $PM_{2.5}$ 的相关研究 (Wise and Comrie, 2005), 但我国针对 $PM_{2.5}$ 的研究相对较少 (张洁琼等, 2018; 秦人洁等, 2019)。

本研究利用 KZ 滤波法, 针对 $PM_{2.5}$ 污染重点区域京津冀城市群, 处理 2013~2018 年逐日 $PM_{2.5}$ 浓度观测数据以及同时段气象要素的逐日数据, 量化气象条件对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度长期变化的影响, 进而区分气象条件和减排措施对长期浓度变化的具体贡献, 从观测角度对 2013~2018 年京津冀地区大气污染治理中“天帮忙”和“人努力”的比例给出一个科学回答。

2 资料与方法

2.1 数据说明

本研究使用的空气污染数据为北京、天津两大直辖市和河北省的保定、唐山、廊坊、石家庄、秦

皇岛、张家口、承德、沧州、衡水、邢台、邯郸 13 个城市 86 个国控站点 (如图 1 所示) 的 $PM_{2.5}$ 浓度逐时观测数据, 选取日均 $PM_{2.5}$ 数据进行 KZ 滤波分析。研究时间段为 2013 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日。本文所用的地面气象数据来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 0.125° (纬度) $\times 0.125^\circ$ (经度) 的 ERA-interim 再分析资料, 研究中使用的气象要素为气温日均值、气压日均值、相对湿度日均值、风速日均值与降水日均值。

2.2 研究方法

KZ 滤波器是 Kolmogorov 在研究太平洋湍流时首次提出的, 并由 Zurbenko 正式定义的一种灵活可配置的低通滤波器 (Yang and Zurbenko, 2010), 常用于 3 种典型情况: 消除高频噪声、从原始信号中分离出低频分量、去除季节影响。

设 $X(t)$ ($t=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 为实值时间序列, KZ 滤波器定义为

$$K_{m,p}[X(t)] = \sum_{s=-p(m-1)/2}^{p(m-1)/2} \frac{a_s^{m,p}}{m^p} X(t+s), \quad (1)$$

其中, m 和 p 是可配置的滤波器参数, $a_s^{m,p}$ 由

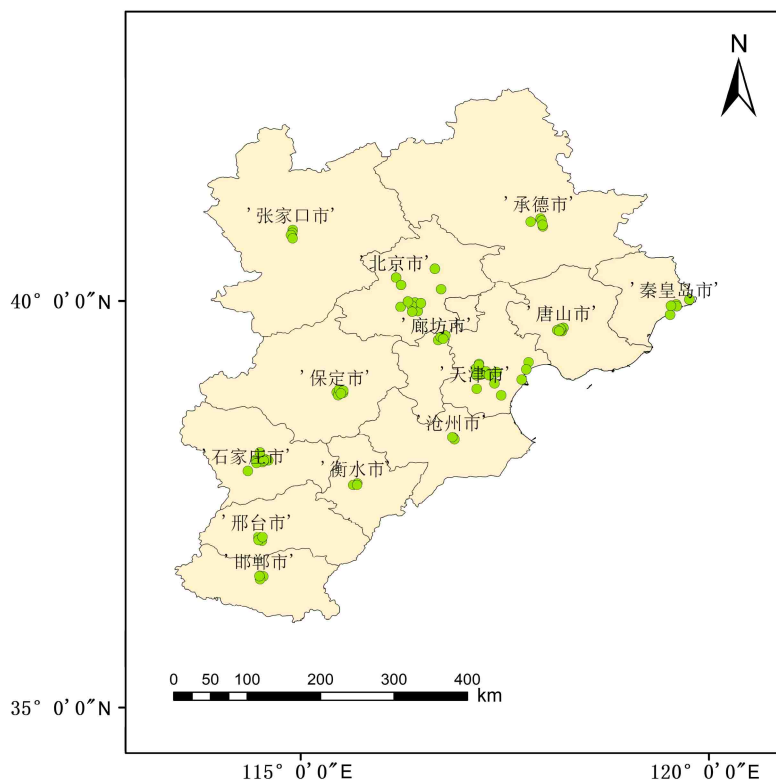


图 1 京津冀地区监测站点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring sites in Beijing–Tianjin–Hebei region

$(1+z+\cdots+z^{m-1})^p$ 的多项式系数给出,

$$\sum_{s=-p(m-1)/2}^{p(m-1)/2} z^{s+p(m-1)/2} a_s^{m,p} = (1+z+\cdots+z^{m-1})^p, \quad (2)$$

也可以认为, 具有参数 m 和 p 的 KZ 滤波器是 m 个点的滑动平均滤波器的 p 次迭代。其计算公式如下:

$$Y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=-k}^k X_{i+j}, \quad (3)$$

其中, Y_i 为经过一次滤波后的时间序列, m 为滑动窗口长度 ($m=2k+1$), k 为对 X_i 进行滤波时其两端的滑动窗口长度, X_i 为原始时间序列。将输出的滤波后的结果作为下一次的滤波输入再次进行计算, 一次迭代计算 p 次, 得到最终的滤波结果 $K_{m,p}(X)$ 。通过调整滤波参数 m 与 p 可以控制不同时间尺度过程的滤波, 有效滤波宽度 N 满足如下公式 (Milanchus et al., 1998):

$$m \times p^{1/2} \leq N, \quad (4)$$

上式表示可以将波长小于 N 的高频滤波滤除。因此设置滤波窗口长度为 365 天, 迭代为 3 次, 滤波器 $K_{365,3}$ 可将原始时间序列中周期小于 632 天的波动滤除, 得到仅反映周期大于 632 天 (约 1.7 年) 的长期变化的趋势; 设置滤波窗口长度为 15 天, 迭代为 5 次, 滤波器 $K_{15,5}$ 可将原始序列中周期小于 33 天的短期波动滤除 (Rao et al., 1997)。

因此将污染物浓度原始时间序列表示为

$$C(t) = M(t) + S(t) + L(t), \quad (5)$$

其中, $C(t)$ 为原始时间序列, $M(t)$ 为短期分量, $S(t)$ 为季节分量, $L(t)$ 为长期分量。短期分量主要受天气系统影响, 排放源除周中周末之外变化很小。季节分量伴随着太阳角度的变化, 主要由排放源和气象条件的季节变化综合影响。长期分量浓度变化受污染排放长期趋势和气候变化等因素影响 (Kumari et al., 2013)。

定义基线时间序列 $X_B(t)$ 为长期分量与季节分量之和, 综合利用滤波器 $K_{365,3}$ 和 $K_{15,5}$ 可得到 3 个分解分量。

$$X_B(t) = L(t) + S(t) = K_{15,5}[C(t)]. \quad (6)$$

$$L(t) = K_{365,3}[C(t)], \quad (7)$$

$$S(t) = X_B(t) - L(t) = K_{15,5}[C(t)] - K_{365,3}[C(t)], \quad (8)$$

$$M(t) = C(t) - X_B(t) = C(t) - K_{15,5}[C(t)]. \quad (9)$$

对浓度时间序列短期分量 $M(t)$ 和基线分量 $X_B(t)$ 分别建立以气象要素为自变量的多元线性回归模型, 可以更有效地消除气象条件的影响 (Flaum et al., 1996; Wise and Comrie, 2005)。回归模型如下所示:

$$M(t) = a_0 + \sum a_i S_i(t) + \varepsilon_M(t), \quad (10)$$

$$X_B(t) = b_0 + \sum b_j B_j(t) + \varepsilon_B(t), \quad (11)$$

其中, $\varepsilon_M(t)$ 、 $\varepsilon_B(t)$ 分别为短期分量回归残差、基线分量回归残差, $S_i(t)$ 为短期分量回归的第 i 个气象因子, $B_j(t)$ 为基线分量回归的第 j 个气象因子, a_0 、 a_i 、 b_0 与 b_j 为回归系数。

浓度时间序列回归的总残差 $\varepsilon(t)$ 是短期分量回归残差 $\varepsilon_M(t)$ 与基线分量回归残差 $\varepsilon_B(t)$ 之和:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = \varepsilon_M(t) + \varepsilon_B(t) = & [M(t) - (a_0 + \sum a_i S_i(t))] + \\ & [B(t) - (b_0 + \sum b_j B_j(t))], \end{aligned} \quad (12)$$

上式代表去除气象条件影响、仅受排放影响的污染物浓度变化。对总残差序列做 KZ 滤波处理可得到受排放变化影响的污染物浓度长期变化分量 $\varepsilon_L(t)$ 。将该浓度长期变化分量叠加到原始浓度序列的长期分量均值 $\overline{L(t)}$ 之上, 即可得到去除气象影响、仅受排放影响的污染物浓度长期分量时间序列:

$$L_{\text{adj}}(t) = \overline{L(t)} + \varepsilon_L(t), \quad (13)$$

也可将此序列称为经气象调整的污染物浓度长期分量时间序列。

基于区分了排放源影响和气象条件影响的 PM2.5 浓度长期分量时间序列, 可分别计算排放源影响下和气象条件影响下 2013 年至 2018 年 PM2.5 浓度趋势变化量, 对比两者的相对比例, 即可得到一个气象条件和减排措施对 PM2.5 浓度趋势变化具体贡献的估计。

3 结果与讨论

3.1 各城市 PM2.5 浓度时间序列分解结果

图 2 为京津冀地区 13 个城市 PM2.5 浓度时间序列分解的结果, 分别是原始时间序列、短期分量、季节分量和长期分量。每个城市的长期分量均有轻微的波动但整体表现为较平稳的下降。BJ、TJ、SJZ、TS、QHD、HD、XT、BD、ZJK、CD、CZ、LF、HS 分别代表北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、

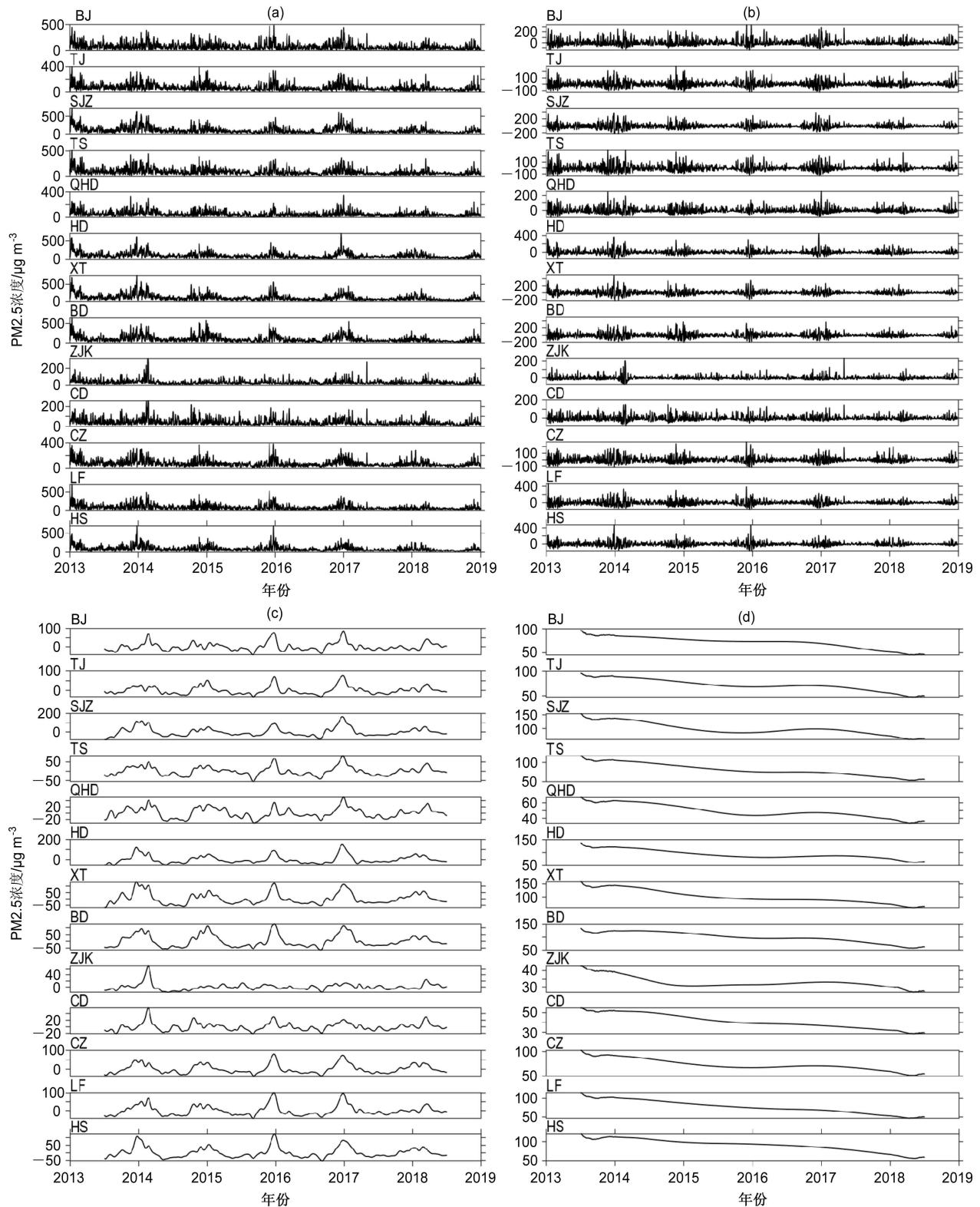


图2 2013~2018年京津冀地区13个城市PM2.5浓度 (a) 原始序列、(b) 短期分量、(c) 季节分量和 (d) 长期分量。BJ: 北京、TJ: 天津、SJZ: 石家庄、TS: 唐山、QHD: 秦皇岛、HD: 邯郸、XT: 邢台、BD: 保定、ZJK: 张家口、CD: 承德、CZ: 沧州、LF: 廊坊、HS: 衡水

Fig. 2 (a) Original sequence, (b) short-term, (c) seasonal, and (d) long-term components of PM2.5 concentration in 13 cities in Beijing–Tianjin–Hebei region during 2013–2018. BJ: Beijing, TJ: Tianjin, SJZ: Shijiazhuang, TS: Tangshan, QHD: Qinhuangdao, HD: Handan, XT: Xingtai, BD: Baoding, ZJK: Zhangjiakou, CD: Chengde, CZ: Cangzhou, LF: Langfang, HS: Hengshui

廊坊、衡水。短期分量出现较明显的振幅，特别是在每年的冬春季出现较大的波动。由于排放源在短期内不会出现较大的变化，因此短期分量的剧烈变化可以看做是由天气的短期变化引起的。季节分量大致呈现一个周期性的变化，波峰出现在冬季和春季，分布为从 6 月到 12 月为上升趋势，12 月到次年 6 月为下降趋势。季节分量出现这样一个周期性的波动，主要是由于北方在冬季存在供暖期，边界层高度低，多静稳天气，以及在春季频发沙尘天气，有助于污染物的累积，而夏季降水频繁，气温高，空气对流强，边界层厚度高，有助于污染物的扩散和沉降 (Zhang and Cao, 2015)。其中，张家口市的短期分量在 2013 年冬季和 2016 年冬季有较大的波动，其余年份没有出现冬季波动大于其他季节的现象。同样，张家口市的季节分量在 2013 年底出现峰值，其余年份的冬季并未出现明显峰值。承德市的短期分量和季节分量与张家口市类似，波动幅度较小，但承德市保留了和其他城市一样的季节特征（即在冬季波动幅度大于其他季节）。季节分量的峰值主要为单峰和较明显的双峰，这种现象可能是春季频发的沙尘导致的。值得注意的是，张家口市在 14 年出现较明显的峰值后，之后年份的波动变得较为平缓，冬春季并未出现明显峰值。

为了了解三分量对原始时间序列的贡献，可计算每个分量对原始数据总方差的贡献。由于短期分

量、季节分量和长期分量在理想情况下相互独立，原始序列的方差应与 3 分量方差之和相等 (白鹤鸣等, 2015)。京津冀地区 13 个城市 PM2.5 各分量方差对原始序列方差的贡献如表 1 所示。由表 1 可知，京津冀各城市的短期分量、季节分量与长期分量三分量方差之和均大于 93%，与原始序列方差（100%）相差较小，这说明三分量基本满足相互独立的条件，也表明 KZ 滤波器对这 13 个城市 PM2.5 浓度具有较好的序列分解能力。分析各分量方差对总方差贡献，石家庄市、邯郸市、邢台市以及保定市短期分量对总方差的贡献在 50% 以上，沧州市与衡水市的短期分量对总方差的贡献在 60% 以上，其余城市均大于 70%。短期分量方差对总方差的贡献平均为 67.9%，为 3 个分量中贡献最大的量，其次为季节分量，长期分量的方差贡献最小。因此，原始时间序列的波动由短期分量和季节分量占主导作用，即主要由污染源排放及气象条件的短期变化和季节变化引起的。要研究长期趋势的变化，必须将长期分量从原始时间序列中分离出来。

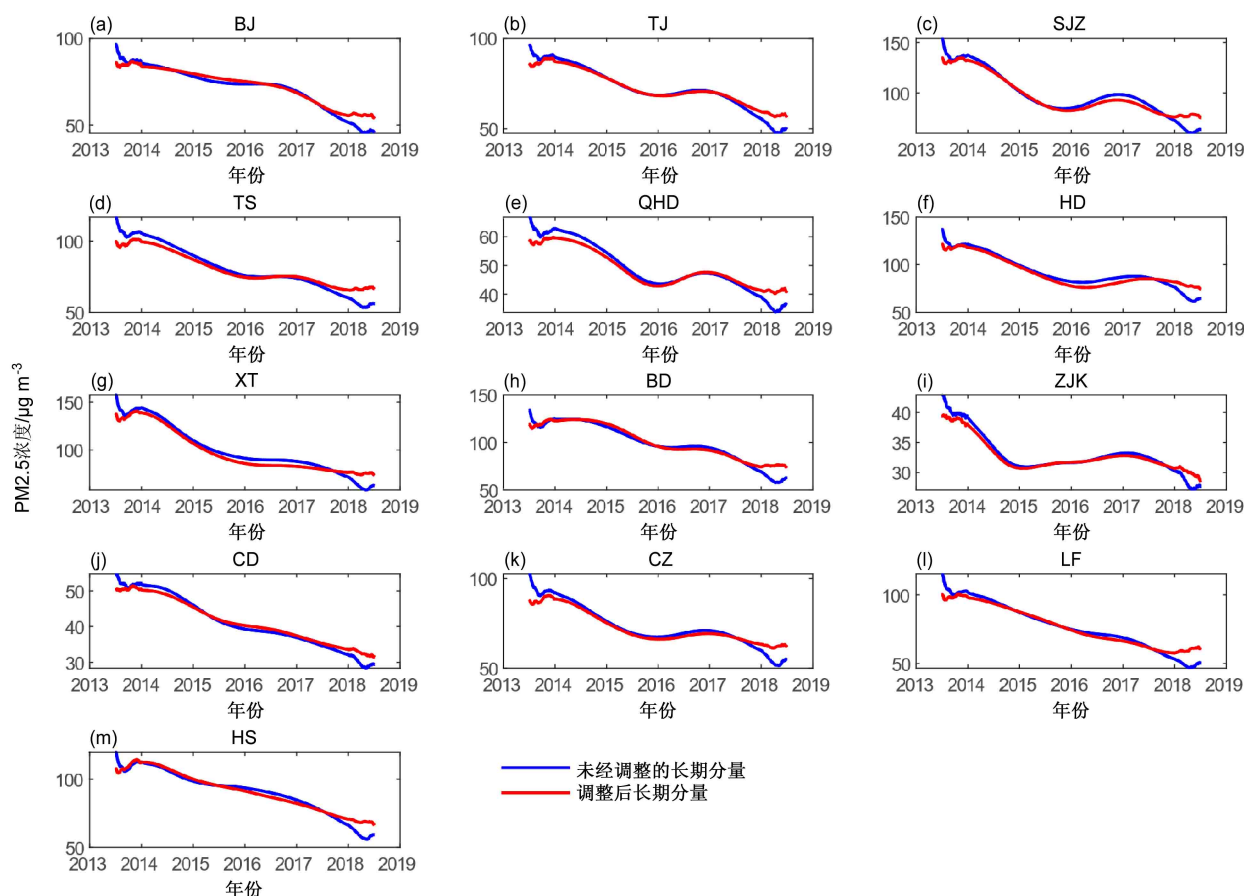
3.2 基于气象条件调整的长期序列

图 3 为气象调整前和气象调整后的长期分量序列。各城市 PM2.5 的长期分量在调整前和调整后的趋势基本一致，只存在细节上的不一致。各城市的长期分量与经气象调整后的长期分量均为波动下

表 1 2013~2018 年京津冀 13 个城市 PM2.5 浓度各分量方差对总方差贡献

Table 1 Contribution of variance in the PM2.5 concentration component to total variance in 13 cities in Beijing–Tianjin–Hebei region during 2013–2018

城市	方差贡献				
	原始序列	短期分量	季节分量	长期分量	分量方差之和
北京	100%	79.89%	12.57%	3.61%	96.06%
天津	100%	74.03%	16.95%	5.08%	96.06%
石家庄	100%	58.28%	28.83%	6.40%	93.50%
唐山	100%	72.17%	16.54%	7.40%	96.11%
秦皇岛	100%	73.98%	16.30%	4.49%	94.76%
邯郸	100%	57.30%	31.61%	5.72%	94.64%
邢台	100%	56.05%	28.24%	8.86%	93.15%
保定	100%	58.12%	30.76%	6.07%	94.94%
张家口	100%	74.72%	17.34%	1.49%	93.55%
承德	100%	75.73%	14.38%	5.30%	95.40%
沧州	100%	67.41%	23.88%	5.12%	96.42%
廊坊	100%	71.82%	18.56%	6.41%	96.25%
衡水	100%	63.36%	25.99%	5.59%	94.94%

图3 2013~2018年京津冀地区13个城市气象条件调整前、后PM_{2.5}浓度长期分量序列Fig. 3 Long-term change trend of PM_{2.5} concentration before and after adjustment in 13 cities in Beijing–Tianjin–Hebei region during 2013–2018

降的趋势。为了更加直观的看到气象条件在研究时间段内对PM_{2.5}浓度的影响，将长期分量与经气象调整后的长期分量做差值，得到气象条件对长期分量的影响，如图4所示。

差值为正，表示由污染源导致的长期分量比污染源与气象共同影响的长期分量小，说明气象条件有利于污染的改善。反之，差值为负，表示由污染源导致的长期分量比污染源与气象共同影响的长期分量大，说明气象条件不利于污染的改善。由图4可知，京津冀各市气象条件对长期分量的影响均在0上下有较为明显的波动，即气象条件在一部分分析时间段内为有利影响，一部分时间段内为不利影响。其中，唐山市、秦皇岛市、邯郸市、承德市与沧州市的气象对长期分量的影响均为由有利于污染的改善变为不利于污染的改善。其余城市气象条件对长期分量的影响在有利于污染改善和不利于污染改善之间浮动。张家口市的气象影响有较小的波动，但波动幅度没有其他城市明显。虽然各城市的气象条件对各城市长期分量的影响既有有利的部分，

也有不利的部分，但经计算，在2013~2018年整个时间段内，各城市气象条件对浓度趋势变化均为有利影响，均促进了PM_{2.5}浓度的降低。

图5标明了减排和气象条件对PM_{2.5}浓度长期趋势变化贡献的比例。饼图的大小表示各城市PM_{2.5}浓度长期分量下降比率的大小，绿色表示由排放源减排对浓度下降的贡献，黄色表示由气象条件对浓度下降的贡献。由图5可知，就京津冀各城市而言，近5年整体来看，气象条件均为促进PM_{2.5}浓度减小的作用，但减排比气象条件对PM_{2.5}浓度减小的影响更加显著，说明近几年京津冀减排措施有力地改善了该区域的空气质量。

3.3 京津冀各城市PM_{2.5}浓度长期分量变化趋势及排放源与气象条件对PM_{2.5}浓度长期分量的影响

表2为京津冀城市群13个城市PM_{2.5}浓度长期分量变化比率以及减排和气象条件对浓度趋势变化的具体贡献比率。京津冀13个城市在2013~2018年均均为下降趋势，平均下降比例为45.1%，

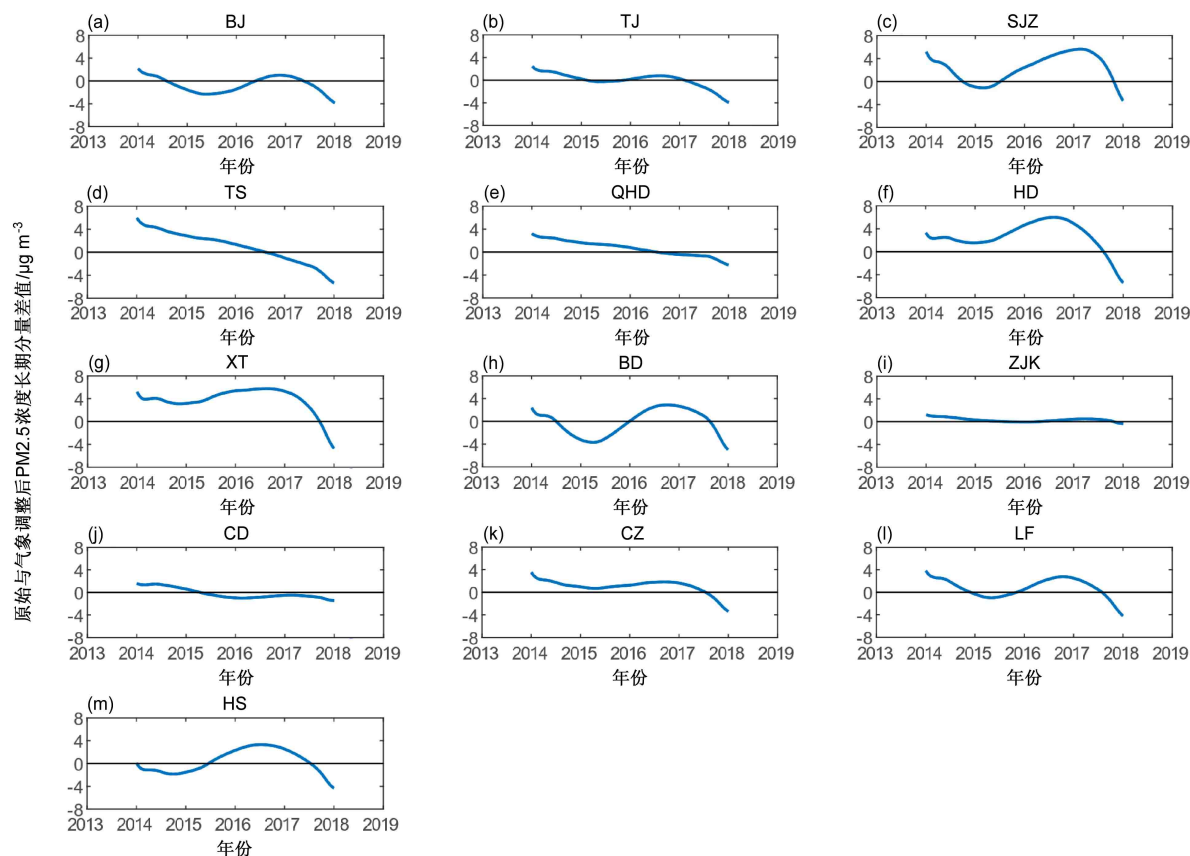


图4 2013~2018年京津冀地区13个城市气象条件对PM2.5浓度长期分量的影响
Fig. 4 Effects of meteorological conditions on long-term components of PM2.5 concentration in 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2013-2018

表2 2013~2018年京津冀地区13个城市长期下降率、排放源与气象条件对PM2.5浓度长期分量的影响
Table 2 Effects of emission sources and meteorological conditions on long-term components and long-term decline rate of PM2.5 concentration in 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2013-2018

PM2.5浓度长期下降率		排放源贡献率		气象条件贡献率	
数值排序	城市	数值排序	城市	数值排序	城市
58.0%	邢台市	92.0%	衡水市	29.2%	唐山市
54.4%	廊坊市	89.1%	保定市	28.2%	秦皇岛市
50.1%	石家庄市	87.2%	石家庄市	26.7%	张家口市
49.5%	唐山市	85.7%	邢台市	24.4%	沧州市
49.5%	保定市	84.3%	承德市	21.0%	天津市
45.8%	承德市	84.1%	廊坊市	17.3%	邯郸市
44.7%	衡水市	83.4%	北京市	16.6%	北京市
44.3%	邯郸市	82.7%	邯郸市	15.9%	廊坊市
43.4%	秦皇岛市	79.0%	天津市	15.7%	承德市
43.3%	北京市	75.6%	沧州市	14.3%	邢台市
42.0%	天津市	73.3%	张家口市	12.8%	石家庄市
39.6%	沧州市	71.8%	秦皇岛市	10.9%	保定市
22.2%	张家口市	70.8%	唐山市	8.0%	衡水市

但每个城市下降程度不同。其中，邢台市的下降比率最大，为58.0%，张家口市下降比率最小，为22.2%，整体趋势而言京津冀西部城市下降比率高

于东部，南部高于北部。

自“大气十条”发布以来，京津冀地区实施了一系列严格的空气污染防治措施，比如控制煤炭消

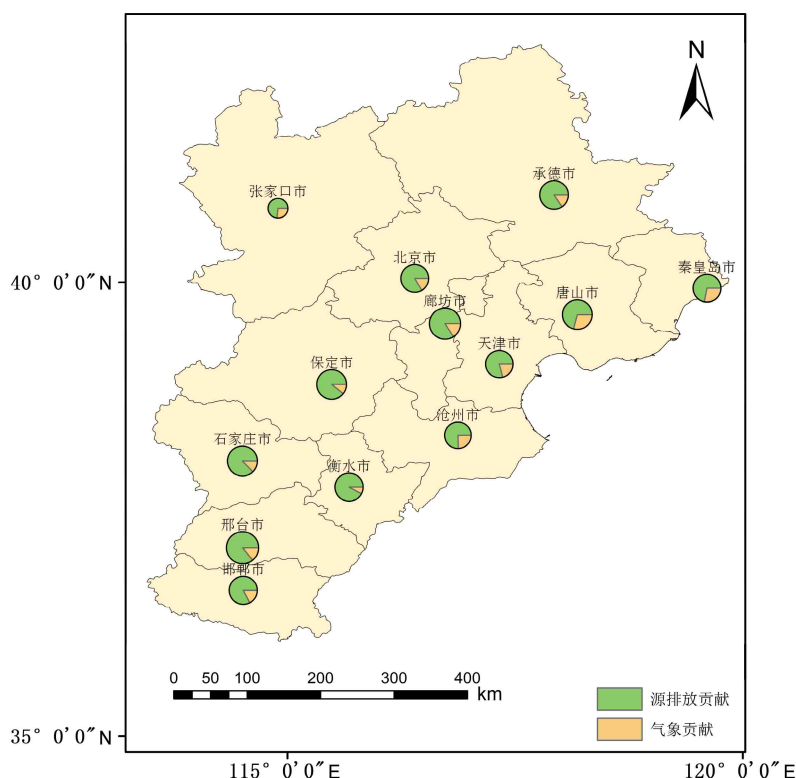


图5 2013~2018年京津冀地区13个城市排放源与气象条件对PM_{2.5}浓度长期分量的影响

Fig. 5 Effects of emission sources and meteorological conditions on long-term components of PM_{2.5} concentration in 13 cities in Beijing–Tianjin–Hebei region during 2013–2018

费、调整产业结构、降低车用燃料、淘汰小型燃煤锅炉等 (He et al., 2019), 这些积极实施的清洁空气政策显著改善了空气质量 (Cai et al., 2017)。京津冀各市气象条件与空气污染防治措施实施的效果不同, 京津冀各城市气象条件对长期分量改变的贡献比例在 8.0%~29.2%, 排放源对长期分量改变的贡献比例在 70.8%~92.0%。其中唐山市的气象条件的贡献比例最大, 为 29.2%, 衡水市的减排措施贡献比例最大, 为 92.0%。

4 结论

本文基于 KZ 滤波使用 2013~2018 年京津冀 13 个城市 86 站点 PM_{2.5} 观测数据, 评估了气象条件和减排措施对该时间段浓度变化的具体贡献, 主要结论如下:

(1) 使用 KZ 滤波的低通滤波特性可以很好地将京津冀 13 个城市 PM_{2.5} 浓度原始时间序列分解为短期分量、季节分量和长期分量, 其中短期分量和季节分量在冬季的波动幅度高于其他季节。短期分量对原始时间序列总方差的贡献最大, 平均

为 67.9%, 其次是季节分量, 说明原始序列的波动主要由污染源排放及气象条件的短期变化和季节变化引起的。

(2) 京津冀 PM_{2.5} 浓度的长期分量呈波动下降的趋势, 下降幅度在 22.2%~58.0%, 说明京津冀 13 个城市在 2013 至 2018 年内空气质量大幅改善。

(3) 针对不同时间尺度的 PM_{2.5} 浓度观测序列, 建立基于多元气象因子的回归模型, 可得到气象校正的 PM_{2.5} 浓度变化长期分量, 从而区分气象条件和减排措施对浓度下降的具体贡献。分析结果表明气象条件对长期分量的影响存在波动但总体处于有利状态。京津冀 13 个城市整体而言, 气象条件增强了减排效果。在导致京津冀 PM_{2.5} 下降的因素中, 气象条件的影响占 8.0% 至 29.2%, 平均为 18.5%; 排放源的影响占 70.8% 至 92.0%, 平均为 81.5%。这说明 2013 年至 2018 年京津冀大气污染治理采取的减排措施效果很好, 气象条件也有一定的促进作用。逐城分析表明: 唐山市的气象条件对 PM_{2.5} 浓度的影响比例最大 (29.2%), 衡水市的减排措施对 PM_{2.5} 浓度的影响比例最大 (92.0%)。

参考文献 (References)

- Ahmadi M, John K. 2015. Statistical evaluation of the impact of shale gas activities on ozone pollution in North Texas [J]. *Science of the Total Environment*, 536: 457–467. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.114
- 白鹤鸣, 师华定, 高庆先, 等. 2015. 基于气象调整的京津冀典型城市空气污染指数序列重建 [J]. *生态与农村环境学报*, 31(1): 44–49.
- Bai Heming, Shi Huading, Gao Qingxian, et al. 2015. Re-ordination of air pollution indices of some typical cities in Beijing–Tianjin–Hebei region based on meteorological adjustment [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment (in Chinese)*, 31(1): 44–49. doi:10.11934/j.issn.1673-4831.2015.01.007
- Cai S, Wang Y, Zhao B, et al. 2017. The impact of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012–2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 580: 197–209. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.188
- Chen Z Y, Xie X M, Cai J, et al. 2018. Understanding meteorological influences on PM_{2.5} Concentrations across China: A temporal and spatial perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(8): 5343–5358. doi:10.5194/acp-18-5343-2018
- Cheng J, Su J, Cui T, et al. 2019. Dominant role of emission reduction in PM_{2.5} Air quality improvement in Beijing during 2013–2017: A model-based decomposition analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9): 6125–6146. doi:10.5194/acp-19-6125-2019
- Flaum J B, Rao S T, Zurbenko I G. 1996. Moderating the influence of meteorological conditions on ambient ozone concentrations [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(1): 35–46. doi:10.1080/10473289.1996.10467439
- Henneman L R F, Holmes H A, Mulholland J A, et al. 2015. Meteorological detrending of primary and secondary pollutant concentrations: Method application and evaluation using long-term (2000–2012) data in Atlanta [J]. *Atmos. Environ.*, 119: 201–210. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.007
- Hogrefe C, Vempaty S, Rao S T, et al. 2003. A comparison of four techniques for separating different time scales in atmospheric variables [J]. *Atmos. Environ.*, 37(3): 313–325. doi:10.1016/S1352-2310(02)00897-X
- Huang Q, Cai X, Wang J, et al. 2018. Climatological study of the boundary-layer air stagnation index for China and its relationship with air pollution [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(10): 7573–7593. doi:10.5194/acp-18-7573-2018
- Ibarra-Berastegi G, Madariaga I. 2003. Traffic congestion and ozone precursor emissions in Bilbao (Spain) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(6): 361–367. doi:10.1065/espr2003.08.170
- He Jiankun, Ye Q, Zheng L, et al. 2019. Synergizing action on the environment and climate: Good practice in China and around the globe.
- Kuebler J, Van Den Bergh H, Russell A G. 2001. Long-term trends of primary and secondary pollutant concentrations in Switzerland and their response to emission controls and economic changes [J]. *Atmos. Environ.*, 35(8): 1351–1363. doi:10.1016/S1352-2310(00)00401-5
- Kumari S, Jayaraman G, Ghosh C. 2013. Analysis of long-term ozone trend over Delhi and its meteorological adjustment [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(6): 1325–1336. doi:10.1007/s13762-012-0162-3
- Leung D M, Tai A P K, Mickley L J, et al. 2018. Synoptic meteorological modes of variability for fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality in major metropolitan regions of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9): 6733–6748. doi:10.5194/acp-18-6733-2018
- Liang X, Li S, Zhang S Y, et al. 2016. PM_{2.5} data reliability, consistency, and air quality assessment in five Chinese cities [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121(17): 10220–10236. doi:10.1002/2016JD024877
- Milanchus M L, Rao S T, Zurbenko I G. 1998. Evaluating the effectiveness of ozone management efforts in the presence of meteorological variability [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 48(3): 201–215. doi:10.1080/10473289.1998.10463673
- 秦人洁, 张洁琼, 王雅倩, 等. 2019. 基于 KZ 滤波法的河北省 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度不同时间尺度分析研究 [J]. *环境科学学报*, 39(3): 821–831.
- Qin Renjie, Zhang Jieqiong, Wang Yaqian, et al. 2019. Study on different time scales of PM_{2.5} and O₃ concentrations in Hebei Province based on KZ filter [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 39(3): 821–831. doi:10.5194/acp-18-3173-2018
- Rao S T, Zurbenko I G. 1994. Detecting and tracking changes in ozone air quality [J]. *Air & Waste*, 44(9): 1089–1092. doi:10.1080/10473289.1994.10467303
- Rao S T, Zurbenko I G, Neagu R, et al. 1997. Space and time scales in ambient ozone data [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(10): 2153–2166. doi:10.1175/1520-0477(1997)078<2153:SATSIA>2.0.CO;2
- Shu L, Xie M, Gao D, et al. 2017. Regional severe particle pollution and its association with synoptic weather patterns in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(21): 12871–12891. doi:10.5194/acp-17-12871-2017
- Wang X Y, Dickinson R E, Su L Y, et al. 2018. PM_{2.5} pollution in China and how it has been exacerbated by terrain and meteorological conditions [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99(1): 105–119. doi:10.1175/BAMS-D-16-0301.1
- Wise E K, Comrie A C. 2005. Extending the Kolmogorov-Zurbenko filter: Application to ozone, particulate matter, and meteorological trends [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 55(8): 1208–1216. doi:10.1080/10473289.2005.10464718
- Yang Q Q, Yuan Q Q, Li T W, et al. 2017. The relationships between PM_{2.5} and meteorological factors in China: Seasonal and regional variations [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12): 1510. doi:10.3390/ijerph14121510
- Yang W, Zurbenko I. 2010. Kolmogorov–Zurbenko filters [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3): 340–351. doi:10.1002/wics.71
- 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 2012. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其危害 [J]. *前沿科学*, 6(1): 22–31.
- Yang Xinxing, Feng Lihua, Wei Peng. 2012.

- Air particulate matter PM_{2.5} in Beijing and its harm [J]. *Frontier Science (in Chinese)*, 6(1): 22–31. doi:10.3969/j.issn.1673-8128.2012.01.005
- 余晔, 夏敦胜, 陈雷华, 等. 2010. 兰州市 PM₁₀ 污染变化特征及其成因分析 [J]. *环境科学*, 31(1): 22–28. Yu Ye, Xia Dunsheng, Chen Leihua, et al. 2010. Analysis of particulate pollution characteristics and its causes in Lanzhou, Northwest China [J]. *Environment Science (in Chinese)*, 31(1): 22–28. doi:10.13227/j.hjkk.2010.01.007
- 张铖麟, 沈劲, 陈多宏, 等. 2014. 定量气象与源排放对 PM₁₀ 浓度影响 [J]. *中国科技论文*, 9(9): 1039–1042. Zhang Chenglin, Shen Jing, Chen Duohong, et al. 2014. Quantifying the impact of meteorological and emission factors on PM₁₀ concentration [J]. *China Sciencepaper (in Chinese)*, 9(9): 1039–1042. doi:10.3969/j.issn.2095-2783.2014.09.016
- 张洁琼, 王雅倩, 高爽, 等. 2018. 不同时间尺度气象要素与空气污染关系的 KZ 滤波研究 [J]. *中国环境科学*, 38(10): 3662–3672. Zhang Jieqiong, Wang Yaqian, Gao Shuang, et al. 2018. Study on the relationship between meteorological elements and air pollution at different time scales based on KZ filtering [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 38(10): 3662–3672. doi:10.3969/j.issn.1000-6923.2018.10.008
- Zhang Y L, Cao F. 2015. Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level [J]. *Sci Rep*, 5: 14884. doi:10.1038/srep14884
- Zhong Q R, Ma J M, Shen G F, et al. 2018. Distinguishing emission-associated ambient air PM_{2.5} concentrations and meteorological factor-induced fluctuations [J]. *Environmental Science & Technology*, 52(18): 10416–10425. doi:10.1021/acs.est.8b02685