

气象条件对 2013—2015 年冬季关中地区空气质量的影响

李晓配¹, 贝耐芳¹, 赵琳娜²

1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院 地球环境科学系, 西安 710054

2. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要: 大气污染是由过度的人为源排放和不利于大气污染扩散的气象条件共同作用的结果, 通过探讨天气形势及气象要素与细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 的关系, 分析气象条件对空气质量的影响, 从而为关中地区的环境治理提供有利的参考依据。本文利用 NCEP-FNL 再分析资料、环境监测资料及有关的降水数据, 对 2013—2015 年冬季关中地区空气质量的演变趋势及其与气象条件的关系进行了研究。结果表明: 2013—2015 年冬季关中地区平均 $PM_{2.5}$ 浓度分别为 $159.5 \mu g \cdot m^{-3}$, $74.2 \mu g \cdot m^{-3}$, $101.8 \mu g \cdot m^{-3}$, 呈现出先明显下降然后又回升的趋势。对 2013—2015 年冬季关中地区天气形势的分类分析表明: 这三年关中冬季的有利天气形势呈先上升后下降的趋势, 能基本解释同期关中地区 $PM_{2.5}$ 的演变趋势。有利天气形势不但会使当天的 $PM_{2.5}$ 降低, 还会使第二天的 $PM_{2.5}$ 维持在较低的水平。因此, 有利天气形势天数的增加会使冬季的整体 $PM_{2.5}$ 浓度下降; 反之, 有利天气形势的减少或不利天气形势的持续则会使 $PM_{2.5}$ 浓度飙升到很高的水平。此外, 风速与每天的 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著的负相关, 可以解释同一天气形势下日平均 $PM_{2.5}$ 浓度的变化。降水对污染物有明显的湿清除作用, 但降水并不是造成 2014 年关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度偏低的主要原因。

关键词: 天气形势; 空气质量; 细颗粒物; 关中地区

Influence of meteorological conditions on the wintertime air quality in the Guanzhong basin during 2013 to 2015

LI Xiaopei¹, BEI Naifang¹, ZHAO Linna²

1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China

2. State Key Laboratory of Disastrous Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Background, aim, and scope Rapid industrialization and urbanization have caused severe air pollution in the Guanzhong basin (GZB), as reflected in the severe and persistent haze with extremely high fine particulate matter ($PM_{2.5}$) frequently engulfs the GZB, particularly during wintertime. Numerous studies have demonstrated that the air pollution

收稿日期: 2017-06-21; 录用日期: 2017-10-11

Received Date: 2017-06-21; Accepted Date: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41275101, 41430424); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2013jdhz25, zdyf2017001)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41275101, 41430424); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (2013jdhz25, zdyf2017001)

通信作者: 贝耐芳, E-mail: bei.naifang@mail.xjtu.edu.cn

Corresponding Author: BEI Naifang, E-mail: bei.naifang@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 李晓配, 贝耐芳, 赵琳娜. 2017. 气象条件对 2013—2015 年冬季关中地区空气质量的影响 [J]. 地球环境学报, 8(6): 516–523.

Citation: Li X P, Bei N F, Zhao L N. 2017. Influence of meteorological conditions on the wintertime air quality in the Guanzhong basin during 2013 to 2015 [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(6): 516–523.

is fundamentally caused by excessive anthropogenic emissions and unfavorable synoptic situations. The meteorological conditions play a key role in the formation, transformation, diffusion, transport, and removal of the air pollutants in the atmosphere. Recent advances in understanding the role of meteorological conditions in the air pollution formation in China have mainly concentrated on the regions of Beijing-Tianjin-Hebei, the Pearl River Delta, and the Yangtze River Delta. However, only a few studies have focused on the impact of the large-scale atmospheric circulation pattern on the air pollution events in the GZB. The large-scale synoptic pattern has been found to generally steer the transport and dispersion of air pollutants in the GZB, providing favorable (unfavorable) conditions for pollutants dispersion (accumulation). The purpose of the present study attempts to investigate evolutions of the air quality and its relationship with meteorological conditions in the GZB during the wintertime of 2013 to 2015. **Materials and methods** Using the NCEP-FNL reanalysis data, through analyzing the synoptic conditions at 850 hPa and the surface level, the large-scale synoptic situations influencing the GZB have been categorized into favorable (“southwest-trough” and “southeast-high”) and unfavorable conditions (“north-low”, “southeast-trough”, “southeast-high”, “transition”). Together with air quality measurements, we have further explored the evolution characteristics of the air quality and its relationship with the synoptic situations in the GZB during the wintertime from 2013 to 2015. The 24-h precipitation data during this period has also been used to find out its impact on the air quality during the study period. **Results** The observed average $PM_{2.5}$ concentrations in GZB during the wintertime of 2013 to 2015 are $159.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $74.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and $101.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The classification of the synoptic conditions in the GZB from 2013 to 2015 shows that favorable synoptic conditions have substantially increased in 2014 and slightly decreased in 2015 compared to those in 2013, which is generally consistent with the variation of $PM_{2.5}$ concentrations in the GZB. In addition, low-level basin-wide average wind speeds and the daily $PM_{2.5}$ concentrations exhibit a good negative correlation, which explains the variation of the daily $PM_{2.5}$ concentrations under the control of the same synoptic situation. Analyses have also indicated that the wind speed has potentials to dominate the air quality regardless of synoptic situations in the GZB. Precipitation generally efficiently washouts air pollutants in the atmosphere, but does not constitutes the main factor to lower the $PM_{2.5}$ level in GZB in 2014. This is mainly due to the small daily precipitation amount and the fewer precipitation days with more favorable synoptic situations during the wintertime of 2014. **Discussion** Favorable synoptic conditions effectively ventilate the GZB and substantially decrease the $PM_{2.5}$ level, improving the air quality in GZB. However, under unfavorable situations, persistent and widespread haze with extremely high levels of $PM_{2.5}$ frequently engulfs GZB. The occurrence of extreme pollution episodes is primarily caused by the air pollutants accumulation from the previous days and the extreme low wind speed. The wind speed is the main factor to determine how much air pollutants could be dispersed or accumulated, which in turn affect the concentration of the $PM_{2.5}$ level in the GZB. **Conclusions** Synoptic situations significantly affect the air pollution in the GZB during the wintertime of 2013 to 2015. Generally favorable synoptic conditions result in good air quality in the GZB and vice versa. The classification of the synoptic situations in the GZB from 2013 to 2015 has shown that the evolution of favorable synoptic conditions is generally consistent with the variation of $PM_{2.5}$ concentrations in the GZB. In addition, the persistent unfavorable synoptic conditions lead to rocketing of the $PM_{2.5}$ level, while the increase of favorable synoptic conditions decrease the $PM_{2.5}$ level overall. The meteorological elements, such as the wind speed, can substantially affect the air quality in GZB. Since the precipitation over the GZB in the wintertime is overall small (smaller than 20 mm during the most of the years), and the precipitation days are generally less in the year with more favorable synoptic situations, the wet deposition process is not the main reason for the low $PM_{2.5}$ level in the winter time of 2014. **Recommendations and perspectives** Since the classification of the synoptic situations are mainly made at 850 hPa that influence the GZB, possible uncertainties may exist in the current results. Future study may include synoptic analysis on more levels and at more times. More quantitative studies are necessary in the future study to improve the understanding on the relationship between meteorological conditions and air quality and provide guidance for the air quality forecasting warning.

Key words: meteorological conditions; air quality; fine particulate matter; Guanzhong basin

大气中污染物的浓度是由排放源与天气形势共同决定的,然而城市中重污染事件往往是由于不利于大气污染物扩散的天气形势而非突增的排放源导致的(Ziomas et al, 1995)。天气形势影响着空气污染物的形成、转换、扩散、输送及清除过程(Seaman, 2000; Solomon et al, 2000; Bei et al, 2008, 2010, 2014)。

目前,天气形势对空气质量的影响已有一些研究。孟燕军和程丛兰(2002)对影响北京地区大气污染的地面天气形势进行分析,并将地面天气形势分为不利于污染物扩散和有利于污染物扩散两大类,其中当地面受低压类天气形势控制时,地面与高空的对流将会加强地面的辐合作用,导致四周的污染物向中心聚集,容易引起大气污染天气的发生。张国璁等(2010)研究了上海市空气质量与地面天气形势的关系,发现不同季节受不同天气形势的影响,并指出夏季出现空气污染通常是受均压场控制,在其他三个季节高压、高压前及均压天气形势易导致大气污染的发生。张宏等(2011)通过对北京能见度的变化趋势与天气形势之间的关系进行研究,发现气象要素受天气形势的控制并影响污染物的浓度。当华北地区为高压均压场时,不利于污染物的扩散;当处于峰后的高压控制时,为有利天气形势。王喜全等(2007)通过对2004年北京地区发生的 PM_{10} 污染天气形势的研究,确定了 PM_{10} 污染天气的发生主要是由于高压南下及弱高压两类天气形势导致的。张岳鹏等(2016)对引起2014年2月北京地区一次 $PM_{2.5}$ 污染的天气形势进行研究,发现污染期间北京地区是受地面高压均压场控制的。陈训来等(2008)分析了2000—2005年香港地区的天气形势及其对空气污染的影响,发现香港空气污染日天数分布有明显的季节性特征,且与该地区的气候特征有很好的 consistency;并指出热带气旋型、大陆冷高压型、入海变性高压型及低压槽型是造成香港地区空气污染的主要天气形势。胡敏等(2006)研究夏季降水对北京地区大气颗粒物影响的研究,结果发现降水对大气污染物粒子有清除作用,尤其对细粒子的清除作用最为明显。Zhang et al (2012)使用PCA (principal component analysis)方法将天气形势分为九类,并研究了北京地区大尺度天气形势与空气污染的关系,发现天气形势是使大气污染物变化的基本动力。Zhao et al (2015)通过利用WRF-Chem模式和观测资料分析关中地区大

尺度气象条件对黑碳的影响,指出天气形势的演变对黑碳的形成有很重要的影响。Bei et al (2016a)就天气形势对大气污染的影响开展了研究,通过主观分类的方法把关中地区冬季主要的天气形势分为六类,并指出影响关中地区的典型天气形势共有六类,其中四类不利于污染物的扩散,两类有利于污染物的扩散。Bei et al (2016b)还选取了一次重污染天气过程进行模拟,结果表明期间的天气形势非常不利于污染物的扩散及输送,如果采用减排措施,则排放源需减少90%以上才能使 $PM_{2.5}$ 浓度达到 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

关于天气形势对空气质量影响的研究主要集中在京津冀和沿海地区,关中地区关于这方面的研究还不太多。本文采用Bei et al (2016a)中的主观分类方法,把2013—2015年期间冬季关中地区的天气形势进行分析分类,结合同期的环境监测资料,研究2013—2015年期间冬季关中地区气象条件对空气质量演变趋势的影响。

1 数据与方法

文中所用的关中地区33个观测站的空气质量指数(AQI数据,包括 O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10})由中国环保部网站提供(<http://datacenter.mep.gov.cn/index>),数据分辨率为日平均。

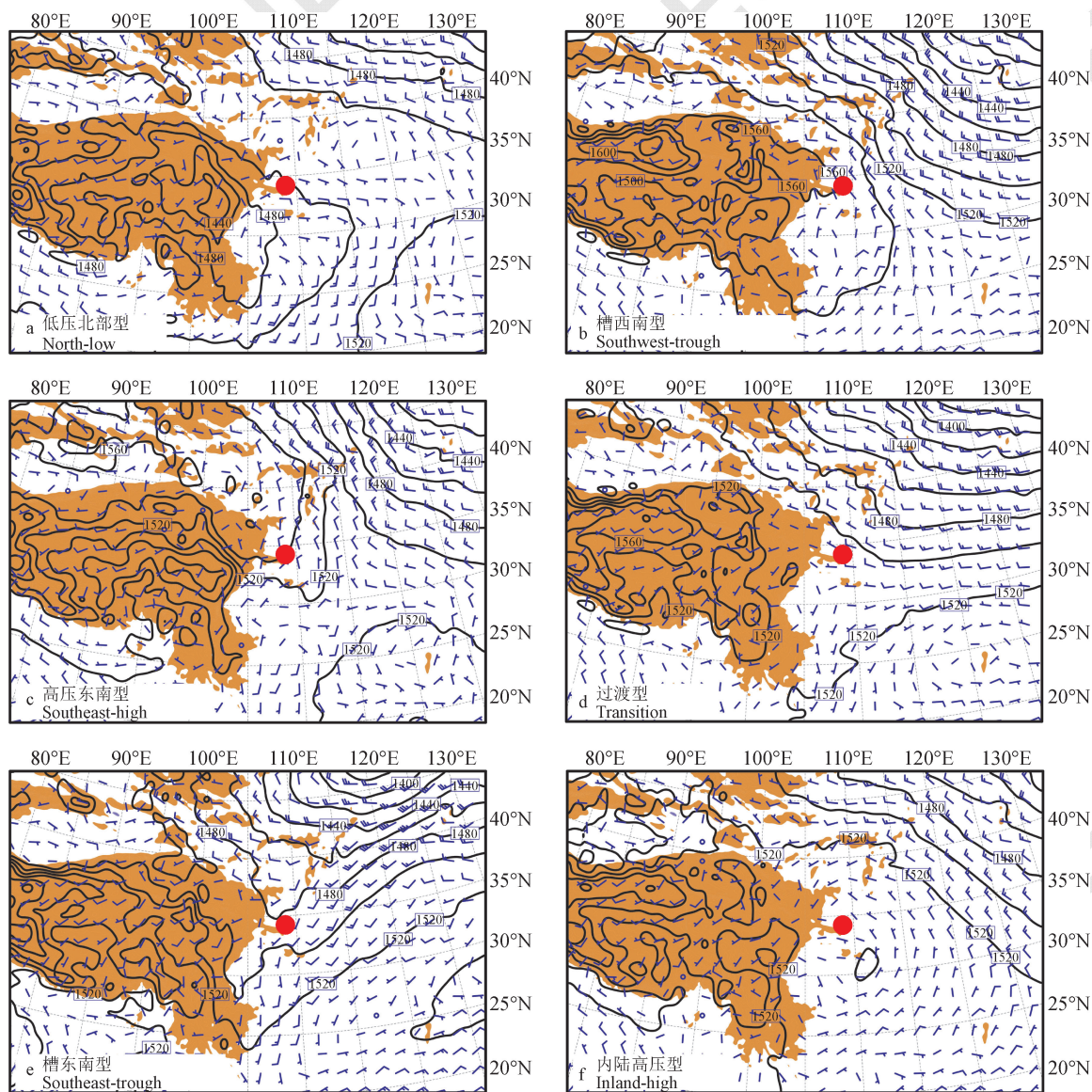
本文采用Bei et al (2016a)中主观分类的方法把关中地区主要的天气形势分为六类,即:低压北部型、槽西南型、高压东南型、过渡型、槽东南型和内陆高压型。在分类的过程中,首先确定影响关中地区的主要天气系统,再考虑主要天气系统与关中地区的相对位置。例如,当关中地区主要受低压的影响且位于低压的北部时,这类天气形势被命名为“低压北部型”;“槽东南型”表示关中地区主要受槽的影响且位于槽的东南方向;“槽西南型”表示关中地区位于槽前或者槽的西南方向;“高压东南型”表示关中地区位于高压东南部;“过渡型”表示关中地区位于槽和脊之间比较平直的气流区;而“内陆高压型”则表示关中地区位于高压的控制下。Bei et al (2016a)还进一步把槽西南型和高压东南型定义为有利天气形势,把低压北部型、过渡型、槽东南型和内陆高压型定义为不利天气形势。

然而,有时天气形势不明显难以判别,则可以利用WRF-Flexpart模式的前向轨迹模拟结果对

污染物的运动轨迹进行分析, 可以通过不同天气形势下粒子的运动轨迹进一步确定天气形势的类型。例如: 当影响关中地区的主要天气系统由内陆高压型向槽西南型转变时, 内陆高压型下静稳的天气形势利于污染物的累积, 但槽西南型天气形势下干冷的空气又有利于污染物的扩散。用 WRF-Flexpart 模式模拟粒子运动的轨迹, 当模拟结果显示粒子向盆地外输送时, 则这时的天气形势为槽西南型, 反之为内陆高压型。此外, 该分类方法

中没有考虑降水的因素, 降水对污染物具有清除作用。因此, 由于天气形势的过渡或降水天气的发生, 同一天气类型中会出现污染物不同的现象。

基于上述天气形势分类的方法, 利用 NCEP-FNL 再分析资料, 通过分析 2013—2015 年冬季关中地区 850 hPa 等压面上的风场及位势高度, 将关中地区的天气形势分为六类。图 1 为对应上述六类天气形势的 850 hPa 的风场及位势高度。



红色圆圈代表西安地区, 橘色部分表示地势高于 1500 m 的部分 (引自 Bei et al., 2016b)。

The red filled circle is Xi'an. The orange shading represents the terrain height over 1500 m (Bei et al., 2016b) .

图 1 关中地区六类天气形势下上午 8 时 850 hPa 风场及位势高度的水平分布图

Fig.1 Composite distributions of winds and geopotential heights on 850 hPa at 08:00 am BJT for the six synoptic situations

2 结果与讨论

2.1 关中地区 PM_{2.5} 浓度的变化趋势

图2为2013—2015年冬季关中地区5个城市(包括西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南)及这五个城市平均的PM_{2.5}浓度的日变化趋势。可以看出,这五个城市及其平均的PM_{2.5}浓度的演变趋势基本一致,其中铜川地区的PM_{2.5}浓度最低,西安

和渭南相对较高。2013—2015年冬季关中地区平均PM_{2.5}浓度分别为159.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 74.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 101.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 呈现出先明显下降然后略有回升的趋势。2013年冬季整体的PM_{2.5}浓度最高,出现两个浓度超过400 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的峰值;2014年整体的PM_{2.5}浓度最低,最大峰值在250 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下;2015年冬季平均的PM_{2.5}浓度介于前两者之间。

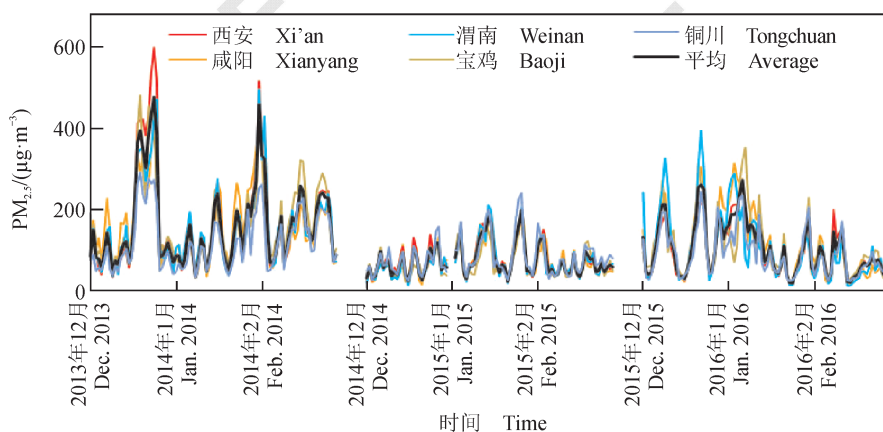


图2 2013—2015年冬季关中地区5个城市(西安、宝鸡、咸阳、铜川和渭南)及其平均的PM_{2.5}浓度的变化趋势

Fig.2 PM_{2.5} concentrations averaged in five cities (Xi'an, Xianyang, Baoji, Weinan, and Tongchuan) and average of the five cities in the Guanzhong basin during the period from the winter of 2013 to 2015

2.2 天气形势对PM_{2.5}的影响

在对2013—2015年冬季关中地区的天气形势进行分析分类的基础上,对各类典型天气形势出现的频率进行了分析。每年各类天气形势出现的频率如图3a所示,每年有利天气形势和不利天气形势的频率如图3b所示。整体来看,2013—2015年冬季关中地区以内陆高压型和槽西南型为主,两类天气形势的总频率分别达58.9%、66.7%和56.0%。其中2013年和2015年内陆高压型出现的频率最高,占比分别为44.4%和32.2%,2014年冬季以槽西南型天气形势为主,占比为34.4%。2013—2015年冬季关中地区均以不利天气形势为主,其中,三年不利天气形势占比分别为80.0%、57.8%和69.2%,呈先下降后上升的趋势,这与关中地区PM_{2.5}浓度变化的趋势相一致。

为了进一步讨论每天的天气形势与PM_{2.5}浓度的对应关系,深入分析了2013—2015年冬季关中盆地逐日PM_{2.5}浓度演变趋势及相应的天气形势类型(图4)。可以发现,在有利天气形势下,PM_{2.5}浓度相对较低且一般大部分都低于不利天气形势下的PM_{2.5}浓度;当天气形势由不利转为有利天气

形势时,PM_{2.5}浓度有明显的下降趋势,反之则有明显的上升趋势。PM_{2.5}浓度的峰值通常出现在不利天气形势中,而低值一般出现在有利天气形势中。持续数天的不利天气形势(天数 ≥ 2 天)会使日平均的PM_{2.5}浓度持续上升,若长时间的持续会导致PM_{2.5}浓度飙升到很高的水平。例如:2013年12月16—25日持续的不利天气形势,使得PM_{2.5}的浓度不断上升,并在2013年12月24日达到477.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的峰值。2014年1月21日—2月8日共持续19天的不利天气形势,PM_{2.5}的浓度呈先上升后下降的趋势,最大的日均PM_{2.5}浓度也达到了458.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的峰值。有利天气形势不但会使当天的PM_{2.5}浓度降低,并且会使第二天的PM_{2.5}浓度维持在较低的水平。因此,有利天气形势天数的增加会使冬季关中盆地整体的PM_{2.5}浓度下降,2014年冬季关中地区有利天气形势的天数明显增加,使得关中地区的PM_{2.5}浓度明显降低,2015年冬季关中地区有利天气形势的天数又略为减少,造成关中地区PM_{2.5}浓度又开始回升。可见,影响关中地区的有利天气形势的天数变化能基本解释2013—2015年冬季关中地区PM_{2.5}浓度整体

水平的演变趋势。

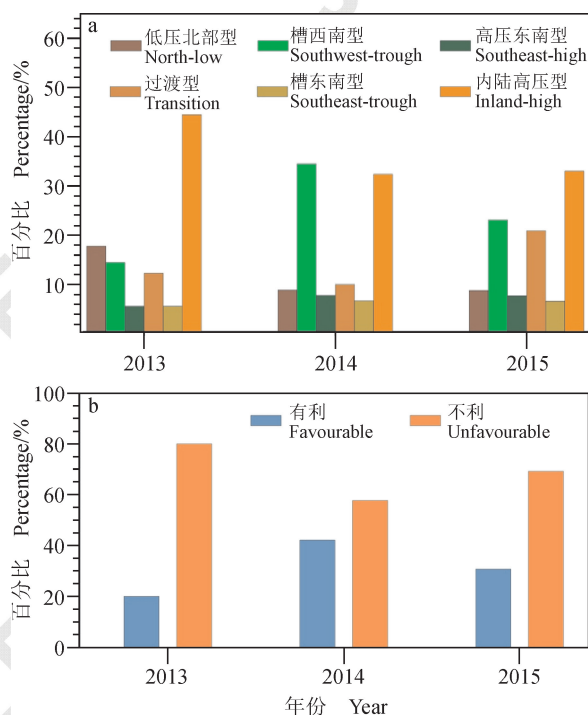


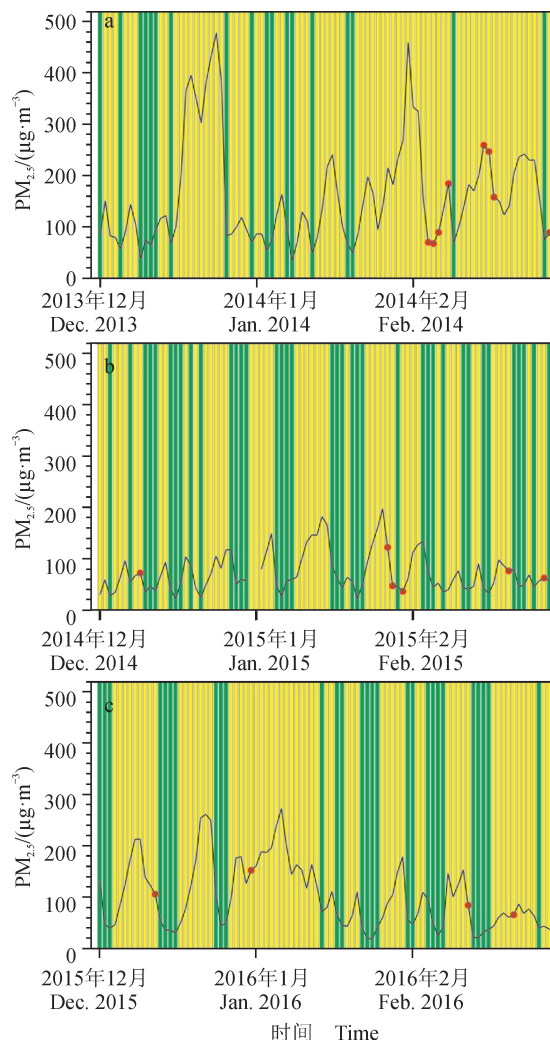
图3 2013—2015年冬季关中地区六类天气形势出现的频率(a)及有利和不利天气形势的占比(b)

Fig.3 Frequency of the six synoptic situations (a) and frequency of favorable and unfavorable synoptic situations in the Guanzhong basin during 2013—2015 (b)

2.3 风速与 $PM_{2.5}$ 的关系

从图4可以看到,即使在有利或不利天气形势下, $PM_{2.5}$ 浓度的日平均值还是有很大的起伏,比如2013年12月16—25日和2014年1月21日—2月8日,这一方面是因为有利和不利天气形势中包含具体的不同天气形势的分类,另一方面,即使在同一天气形势下, $PM_{2.5}$ 浓度的日平均值也会有很大差异(图略)。为此,进一步分析了2013—2015年冬季关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度日均值与风速的对应关系(图5),发现 $PM_{2.5}$ 浓度日均值与关中地区的平均风速均呈较好的负相关关系,这表明:不管关中地区处于哪种天气形势下,关中地区平均风速的大小将具体决定当天 $PM_{2.5}$ 浓度的高低。对于有利天气形势,风速的大小将决定污染物被扩散的程度,从而决定该地区 $PM_{2.5}$ 浓度值;对于不利天气形势,风速的大小将决定污染物被累积的多少,从而决定该地区 $PM_{2.5}$ 浓度值。从图5中还可以看出 $PM_{2.5}$ 浓度的极高(低)值基

本对应区域平均风速的极低(高)值。因此,每类天气形势下风速与 $PM_{2.5}$ 浓度之间都有较好的负相关关系,这可以解释同一类天气形势下日平均 $PM_{2.5}$ 浓度的变化。



绿色表示有利天气形势,黄色表示不利天气形势,红色圆圈表示降水天气(降水量 $>1\text{ mm}$)。

Green denotes favorable synoptic situation and yellow denotes unfavorable situation, and the red dots indicate dates with precipitation.

图4 2013—2015年冬季关中地区日平均 $PM_{2.5}$ 浓度的时间演变图及相应的天气形势

Fig.4 Daily averaged $PM_{2.5}$ concentration and the related synoptic situation during wintertime of 2013—2015

2.4 降水对 $PM_{2.5}$ 的影响

为了进一步了解2013—2015年冬季降水对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,对2013—2015年冬季关中地区的24小时降水量进行了分析(图6)。结果表明:2013—2015年冬季关中盆地平均的24小时降水

量及降水日数均呈先下降后上升的趋势。2014年冬季关中地区出现14天的降水日, 降水量仅为11.1 mm, 均为三年中最低值。因此降水的湿清除作用并不是造成2014年冬季关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度偏低的原因。

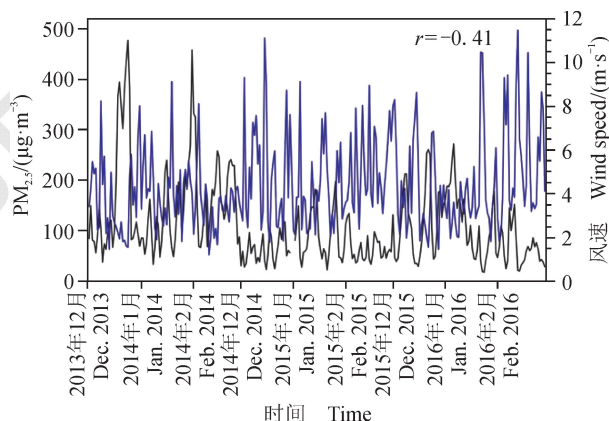


图5 2013—2015年冬季关中地区 $PM_{2.5}$ 浓度与平均风速的变化趋势

Fig.5 Changes of $PM_{2.5}$ concentrations and average wind speed in the Guanzhong basin during the period from the winter of 2013 to 2015

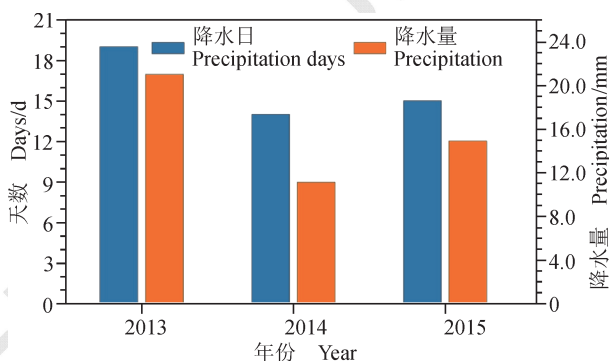


图6 2013—2015年冬季关中地区每年降水日及降水量(降水量 >0.1 mm)的变化

Fig.6 Annual rainy days and precipitation in the Guanzhong basin during the period from the winter of 2013 to 2015

另外, 2013—2015年冬季关中地区一共有18天的日降水量在1 mm以上(图7), 其中在10天的降水天气中, $PM_{2.5}$ 的浓度有不同程度的下降(图4)。另外8天降水天气中 $PM_{2.5}$ 的浓度没有下降, 从图7可知, 其中5天的降水量特别少, 分别为2014年2月15日、2014年12月9日、2015年2月27日、2015年12月31日及2016年2月

21日, 降水量分别为1.1 mm、1.1 mm、1.4 mm、1.1 mm和1.6 mm, 可见少量的降水不会使污染物的浓度降低。其他3天, 即2014年2月6日、2014年2月8日和2014年2月28日, 这几天的降水量分别为2.5 mm、2.1 mm和2.9 mm, 虽然降水量略大, 但这几天的风向均为偏东风且风速较小, 由于关中地区的地势特点, 较小的偏东风有助于污染物的累积。可见, 降水的湿清除作用还取决于降水量的大小, 关中地区平均3 mm以下的24小时降水可能对 $PM_{2.5}$ 浓度没有影响。

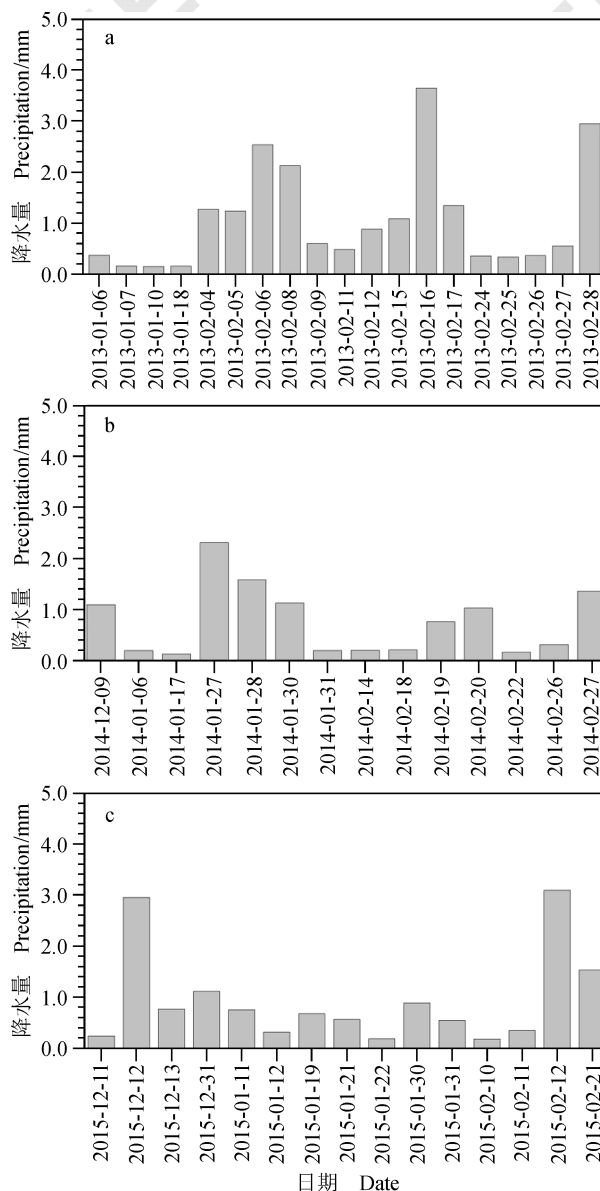


图7 2013—2015年冬季关中地区每个降水日的降水量(降水量 >0.1 mm)变化

Fig.7 Annual precipitation for each precipitation day in the Guanzhong basin during the period from the winter of 2013 to 2015

3 结语

(1) 天气形势是影响2013—2015年冬季关中地区PM_{2.5}浓度的主要因素之一,2013—2015年冬季有利天气形势的天数变化趋势可以基本解释同期PM_{2.5}浓度的演变趋势。有利天气形势不但会使当天的PM_{2.5}降低,还会使第二天的PM_{2.5}维持在较低的水平。因此,有利天气形势天数的增加会使冬季关中地区的整体PM_{2.5}浓度下降,反之,有利天气形势的减少或不利天气形势的持续则会使PM_{2.5}浓度飙升到很高的水平。

(2) 2013—2015年冬季关中盆地平均风速与每天的PM_{2.5}浓度日均值呈较好的负相关,可以解释同一天气形势下日均PM_{2.5}浓度的变化。

(3) 2014年冬季的降水日数及降水量均为这三年最低,因此降水并不是造成2014年冬季关中地区PM_{2.5}浓度偏低的原因。降水虽然对污染物有清除作用,但小于3 mm的24小时降水不会使污染物的浓度明显降低。

参考文献

陈训来,范绍佳,李江南,等. 2008. 香港地区空气污染的典型天气背景形势[J]. *热带气象学报*, 24(2): 195–199. [Chen X L, Fan S J, Li J N, et al. 2008. The typical weather characteristics of the air pollution in Hong Kong area [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 24(2): 195–199.]

胡敏,刘尚,吴志军,等. 2006. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J]. *环境科学*, 27(11): 2293–2298. [Hu M, Liu S, Wu Z J, et al. 2006. Effects of high temperature, high relative humidity and rain process on particle size distribution in the summer of Beijing [J]. *Environmental Science*, 27(11): 2293–2298.]

孟燕军,程从兰. 2002. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析[J]. *气象*, 28(4): 42–47. [Meng Y J, Cheng C L. 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area [J]. *Meteorological*, 28(4): 42–47.]

王喜全,齐彦斌,王自发,等. 2007. 造成北京PM₁₀重污染的二类典型天气形势[J]. *气候与环境研究*, 12(1): 81–86. [Wang X Q, Qi Y B, Wang Z F, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM₁₀ heavy air pollution in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 12(1): 81–86.]

张国珽,甄新蓉,谈建国,等. 2010. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析[J]. *热带气象学报*, 26(1): 124–128. [Zhang G L, Zhen X R, Tan J G, et al. 2010. The analysis of the relationship between the air quality in Shanghai and surface pressure patterns and Meteorological factors [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 26(1): 124–128.]

张宏,刘子锐,胡波,等. 2011. 北京能见度变化趋势及冬季一次典型污染过程分析[J]. *气候与环境研究*, 16(5): 620–628. [Zhang H, Liu Z R, Hu B, et al. 2011. Analysis of trends of visibility and its characters during air seriously polluted days in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 16(5): 620–628.]

张岳鹏,李璇,聂滕,等. 2016. 2014年2月北京PM_{2.5}污染过程及天气形势分析[J]. *气象与环境科学*, 39(2): 55–62. [Zhang Y P, Li X, Nie T, et al. 2016. Analysis of PM_{2.5} pollution process and weather situation in Beijing in February 2014 [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 39(2): 55–62.]

Bei N, Bo X, Ning M, et al. 2016b. Critical role of meteorological conditions in a persistent haze episode in the Guanzhong basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 550: 273–284.

Bei N, de Foy B, Lei W, et al. 2008. Using 3DVAR data assimilation system to improve ozone simulations in the Mexico City basin [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 8: 7353–7366.

Bei N, Lei W, Zavala M, et al. 2010. Ozone predictabilities due to meteorological uncertainties in Mexico City basin using ensemble forecasts [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 10: 6295–6309.

Bei N, Li G, Huang R J, et al. 2016a. Typical synoptic situations and their impacts on the wintertime air pollution in the Guanzhong basin, China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 16: 1–34.

Bei N, Li G, Meng Z, et al. 2014. Impacts of using an ensemble Kalman filter on air quality simulations along the California-Mexico border region during Cal-Mex 2010 Field Campaign [J]. *Science of the Total Environment*, 499: 141–153.

Seaman N L. 2000. Meteorological modeling for air-quality assessments [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 2231–2259.

Solomon P, Cowling E, Hidv G, et al. 2000. Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 34: 1885–1920.

Zhang J P, Zhu T, Zhang Q H, et al. 2012. The impact of circulation patterns on regional transport pathways and air quality over Beijing and its surroundings [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 12: 5031–5053.

Zhao S, Tie X, Cao J, et al. 2015. Seasonal variation and four-year trend of black carbon in the Mid-west China: The analysis of the ambient measurement and WRF-Chem modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 123: 430–439.

Ziomas I C, Melas D, Zerefos C S, et al. 1995. Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables [J]. *Atmospheric Environment*, 29: 3703–3711.