

西安市大气污染物浓度特征及影响因素分析

郭伟¹, 程燕¹, 樊巍¹, 王妮¹, 肖波^{1,2}

(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 710049;

2. 西安市气象局, 西安 710016)

摘要: 以西安市环境监测站公布的 2010—2012 年大气污染物数据作为分析资料, 结合各监测点所处位置和年际间的污染物浓度数据差异, 分析 2010—2012 年间西安市大气污染物随时间和空间的分布特征, 并进行了污染状况与风向风速、降雨、雾霾天气及冬季采暖等因素的关联性分析。结果表明, PM₁₀ 是西安市的主要空气污染物, 其次是 NO₂、SO₂。SO₂ 污染状况呈下降趋势, 2010 (43.2±26.0 μg·m⁻³) > 2011 (42.3±35.2 μg·m⁻³) > 2012 (40.2±25.6 μg·m⁻³); NO₂ 浓度变化趋势与 SO₂ 有所不同, 呈先下降后增高的趋势, 2010—2011 下降 9%, 2011—2012 升高 2.7%; PM₁₀ 的变化趋势与 NO₂ 相同, 2010 (123.8±20.8 μg·m⁻³) > 2012 (118.8±40.8 μg·m⁻³) > 2011 (118.4±37.9 μg·m⁻³)。时空分布特征显示西安市大气污染物浓度夏季最低, 冬季、春季最高; 高压开关厂、高新西区污染较重, 草滩、兴庆小区污染较轻。降雨量、风向风速都能影响大气污染状况, NO₂ 与风向风速的相关性最强, PM₁₀ 与降雨量的相关性最强, 小雨更有利于 PM₁₀ 去除。扬尘天气会使 PM₁₀ 浓度剧增 4 倍左右, 但对 SO₂ 和 NO₂ 浓度没有太大的影响; 雨天 SO₂, NO₂, PM₁₀ 的浓度都低于非下雨天的浓度; 采暖季污染重于非采暖季, 其中 SO₂ 的浓度受采暖的影响最大, 其次是 PM₁₀, 最小的是 NO₂。

关键词: 西安; PM₁₀; SO₂; NO₂, 影响因素

中图分类号: X51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)04-0235-08

Characteristics and affecting factors of atmospheric pollutants in Xi'an

GUO Wei¹, CHENG Yan¹, FAN Wei¹, WANG Ni¹, XIAO Bo^{1,2}

(1. Department of Environmental Science and Technology, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China)

Abstract: The temporal and spatial characteristics of airborne pollutants (e.g., PM₁₀, SO₂, and NO₂) in Xi'an were studied based on three-year continuous measurements of the air quality monitoring network of Xi'an Environmental Protection Bureau. Meteorological data such as temperature, humidity, rainfall, wind speed, and wind direction were used to identify the factors affecting the air quality in ambient atmosphere. PM₁₀ is the main air pollutant, followed by NO₂ and SO₂. Annual average SO₂ concentrations have decreased slightly from 2010 to 2012. PM₁₀ and NO₂ have the same trend with 2010 (123.8±20.8 μg·m⁻³ for PM₁₀ and 45.8±13.6 μg·m⁻³ for NO₂) > 2012 (118.8±40.8 μg·m⁻³ for PM₁₀ and 42.7±15.6 μg·m⁻³ for NO₂) > 2011 (118.4±37.9 μg·m⁻³ for PM₁₀ and 41.6±14.2 μg·m⁻³ for NO₂). The concentration of air pollutants in Xi'an is lowest in summer and highest in autumn or winter. For the spatial characteristics of air quality, the districts

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (21107084)

通讯作者: 程燕, E-mail: chengyan@mail.xjtu.edu.cn

of Switchgear Factory and western High-tech are heavily polluted, while the districts of Caotan and Xingqing community are better. Several meteorological data have been found to affect the loading of pollutants in atmosphere. Concentrations of pollutants are generally affected by wind speed, especially for NO_2 . The concentrations of PM_{10} decrease significantly after a rainfall, especially in drizzling time, but increase substantially during a hazy day, with a maximum of four times of a normal day. Poor air quality has been found during heating seasons and concentrations of SO_2 are increased significantly.

Key words: Xi'an; PM_{10} ; SO_2 ; NO_2 ; affecting factors

大气污染物不仅能够影响区域能见度 (Watson, 2002; Cheung et al, 2005), 对气候变化 (IPCC, 2007), 人体健康 (Pope and Dockery, 2006; Sacks et al, 2011) 更有深层次的影响。大气污染物浓度监测数据, 在日益受到居民的普遍关注的同时, 更是一个衡量城市大气环境质量的重要指标。各监测点由于所处位置、时间的不同会导致监测数据呈现出一定的差异性。研究过去近几年的污染物浓度的时间和空间变化规律能够很好地体现一个城市或地区在环境保护方面的成效。本文以西安市环境监测站所公布的 2010—2012 年的大气污染物数据资料作为分析依据, 结合各监测点所处位置和年际间的污染物浓度数据差异, 分析 2010—2012 年间西安市大气污染物随时间和空间的分布特征, 并进行了污染状况与气象因素、污染状况与各种天气相关性分析, 为进一步改善城市大气环境质量, 制定合理经济方针和环保措施提供较为科学的参考依据。

1 数据来源

本文所用空气污染指数资料取自 2010—2012 年西安市环境监测站所公布的空气质量日报数据 (<http://www.xianemc.gov.cn/>)。数据包括污染物空气污染指数、各监测点位污染物空气污染指数、首要污染物。所用 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 浓度数据是根据空气污染指数的定义和 IAPI 分级表计算得到的 (见表 1), 代表西安市区及各监测点位的平均空气质量状况。气象资料数据来源于西安市气象局, 数据集包含 5 个地面气象要素, 即气压、风速、气温、相对湿度、降水量。

$$C_X = \frac{(I_X - I_{X_j})(C_{X_{j+1}} - C_{X_j})}{I_{X_{j+1}} - I_{X_j}} + C_{X_j} \quad (1)$$

I_X —污染物 X 的污染分指数;

C_X —污染物 X 的浓度监测值;

I_{X_j} —第 j 转折点的污染分项指数值;

$I_{X_{j+1}}$ —第 $j+1$ 转折点的污染分项指数值;

C_{X_j} —第 j 转折点上污染物的浓度限值;

$C_{X_{j+1}}$ —第 $j+1$ 转折点上污染物的浓度限值;

表 1 空气污染分指数及对应的污染物浓度限值 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Table 1 The air pollution index and the corresponding pollutant concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

IAPI	污染物项目浓度限值 (24 小时平均)		
	PM_{10}	SO_2	NO_2
500	600	2620	940
400	500	2100	750
300	420	1600	565
200	350	800	280
100	150	150	120
50	50	50	80

2 大气污染物时空变化特征

2.1 大气污染物时间变化

通过对西安市环境监测站公布的 2010—2012 数据进行统计和计算, 结果 (见表 2) 表明, 西安市大气污染物浓度夏季最低, 冬季、春季最高。 PM_{10} 为西安市首要空气污染物, PM_{10} 波动范围是 $70.8\sim 215.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次是 NO_2 、 SO_2 , 其波动范围分别为 $26.4\sim 78.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $14.9\sim 106.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 与 SO_2 浓度比值差异较大, 比率处于 $1.53\sim 6.58$; PM_{10} 和 NO_2 的比值集中在 3 附近。大气空气质量在年内呈现污染—良好—污染的变化趋势, 存在明显的季节变化规律, 其污染程度为冬季 (12 月—2 月) > 春季 (3 月—5 月) > 秋季 (9 月—11 月) > 夏季 (6 月—8 月)。这与 Zhang et al (2012) 对中国拉萨、大连、南宁等 16 个城市的研究结果基本相同, 冬季 PM_{10} 质量浓度是秋季至冬季这段时间的 1.5 倍 (14 城市呈现此趋势), 春季的

PM₁₀ 污染程度次之(11城市呈现此趋势),夏季最低。与此不同的是,对于细颗粒物(PM_{2.5}),Abdeen et al(2014)对巴勒斯坦、以色列和约旦等11个监测点的结果显示,夏季(4月—6月,37.3 μg·m⁻³)PM_{2.5}平均浓度高于冬季(10月—12月,26.0 μg·m⁻³)。邵天杰等(2008)解释这些污染物浓度的变化与气候因素、气象因素以及居民生活方式等因素有关。受静风、雾霾等不利气象因素影响,PM₁₀最高月均值出现在2012年12月,分别是当月SO₂、NO₂浓度的3.12、4.82倍;最低月均值出现在2011年9月,分别是当月SO₂、NO₂浓度的4.27、2.54倍。年际之间,也呈现出较明显的变化趋势,污染严重状况2010>2012>2011(年均值:PM₁₀:118.4±39.9 μg·m⁻³,SO₂:42.3±35.2 μg·m⁻³,NO₂:

41.6±14.2 μg·m⁻³)。PM₁₀、NO₂污染物超国家二级标准(《环境空气质量标准》G3095-2012)天数,2010>2012>2011(PM₁₀:288天;NO₂:135天);SO₂超标国家二级标准天数,2011>2010>2012(SO₂:59天)。从2010年到2012年,SO₂的年均浓度由43.2 μg·m⁻³逐年下降到40.2 μg·m⁻³,共降低6.9%;NO₂的年均浓度先由45.8 μg·m⁻³下降到41.6 μg·m⁻³,再升高到42.7 μg·m⁻³,2011年污染最轻;PM₁₀的年均浓度变化情况与NO₂相同,2010年污染最严重,年均浓度123.8 μg·m⁻³,是国家二级标准(70 μg·m⁻³)的1.77倍,超标331天,超标率高达90.9%。SO₂的污染程度在夏季和冬季有着非常大的差别,这主要是因为冬季城区采暖期燃煤和周边农村燃烧柴薪取暖所致(沈振兴等,2009)。

表2 2010—2012年西安市主要污染物浓度月平均值(μg·m⁻³)
Table 2 The month average concentration of main pollutants of Xi'an from 2010 to 2012 (μg·m⁻³)

月份	2010			2011			2012		
	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀
1	77.9±23.7	58.6±11.6	135.2±44.2	101±36.3	61.8±15.7	159.9±48.2	104.6±42.4	78.5±23.9	160.4±74.4
2	60.3±19.9	48.1±16.3	122±48.9	106.3±33.5	66.7±16.9	195.8±73.8	59.8±21.7	58.8±18.6	119.7±55.6
3	43.6±13.8	46.2±7.1	142.6±55.6	53.1±23.1	55.6±13.4	141.3±55.2	44.5±10.5	58.8±12.5	116.8±35.8
4	31.1±5.0	40.0±6.1	126.6±57.8	32.8±9.0	48.9±13.3	144.6±36.1	30.4±5.5	42.4±6.5	105.8±26.4
5	26.8±6.3	35.1±6.5	120.2±32.4	18.4±6.8	34.2±8.6	90.6±33.1	23.5±5.7	36.6±11.0	99.9±25.7
6	22.4±6.4	33.5±9.1	99.7±27.6	18.7±5.7	31.8±9.1	85.7±26.4	28.9±4.4	31.9±6.2	79.4±14.6
7	14.9±5.6	29.9±5.9	98.0±25.1	18.7±5.2	29.7±8.2	90.9±30.6	22.3±4.1	26.4±5.0	72.1±22.3
8	16.3±6.3	30.9±6.0	99.5±30.0	16.4±3.7	29.6±6.3	96.0±34.1	22.9±3.8	28.5±4.6	83.0±25.0
9	25.4±8.6	35.9±10.3	101.1±30.5	16.6±5.9	27.8±6.2	70.8±33.0	22.5±3.1	28.6±4.4	92.2±36.3
10	34.5±8.6	59.5±21.9	131.6±52.1	17.6±2.5	31.7±5.5	97.5±33.4	23.9±1.8	39.8±5.2	143.7±37.0
11	81.7±32.0	69.5±17.0	154.7±40.2	22.5±8.4	30.3±7.2	100.8±44.0	30.6±9.3	37.1±9.3	136.8±49.1
12	84.0±26.6	61.9±17.5	153.8±48.7	85.3±23.0	50.6±16.2	146.5±56.2	69.1±20.8	44.8±14.0	215.8±120.3

2.2 大气污染物空间变化

选取其中6个主要环境监测点用以代表不同的功能区,分别是西安高压开关厂、兴庆小区、纺织城、小寨、高新西区、草滩;依次代表工业区、居民区、轻工业区、商业区、高新技术产业开发区和清洁对照点。由于污染物浓度受多种因素的影响,同一监测点的不同污染物浓度变化趋势也存在着很大的差异(邵天杰等,2008)。表3为以上6监测点2010—2012年SO₂、NO₂、PM₁₀浓度值。6个监测点中高压开关厂的SO₂污染程度最高,达48.5 μg·m⁻³,草滩的SO₂污染程度最低,为33.0 μg·m⁻³,均达到国家二级标准。SO₂污染

程度,工业区>商业区>居民区>对照点。高新西区、小寨三年来的SO₂污染连续下降,分别由45.8 μg·m⁻³降低到38.4 μg·m⁻³,49.4 μg·m⁻³降低到42.1 μg·m⁻³,降幅率高达16.2%,14.7%。纺织城、高压开关厂、兴庆小区等监测点的SO₂污染状况2011年最轻,2010年最重,呈现出先降低后升高的趋势。与此不同的是,草滩SO₂污染程度却一直在加重,2012年达到36.4 μg·m⁻³。小寨的NO₂污染程度最高,达49.9 μg·m⁻³,高于国家二级标准;对照点草滩NO₂污染程度最低,为36.3 μg·m⁻³,低于国家二级标准。NO₂污染程度,商业区>工业区>居民区。小寨的NO₂监测浓度三年来一直在降低,

污染状况得到有效改善, 由2010年 $55.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低到2012年 $45.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 降低率达18.1%。与此相反, 草滩的 NO_2 污染程度却逐年增加, 由2010年 $34.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到2012年 $38.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增加率达10.9%。草滩的 PM_{10} 污染程度最高, 达 $125.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 纺织城的 PM_{10} 污染程度最低, 为 $117.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均高于国家二级标准值 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 污染程度, 对照点 > 工业区 > 商业区 > 居民区。草滩 PM_{10} 浓度高于大多数监测点, 已不再适合继续作为西安市 PM_{10} 污染状况的清洁对照点使用, 这是因为草滩作为西安城市化北移的重点区域, 近几年修建了大量食品饮料产业, 印刷包装产业, 道路以及城中村改造项目所致。

表3 2010—2012年6监测点3种污染物浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Table 3 Three pollutants concentration in six monitoring stations from 2010 to 2012 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

点位	SO_2	NO_2	PM_{10}
草滩	33.0 ± 24.7	36.3 ± 15.6	125.5 ± 55.9
纺织城	39.1 ± 32.5	48.1 ± 23.3	117.4 ± 59.5
高新西区	43.0 ± 34.0	46.0 ± 21.6	121.6 ± 60.2
高压开关厂	48.5 ± 36.9	49.2 ± 21.3	124.3 ± 57.4
兴庆小区	37.9 ± 32.7	39.3 ± 20.8	118.5 ± 57.5
小寨	46.6 ± 41.1	49.9 ± 23.2	118.7 ± 60.5

所述监测点由于功能区的差异, PM_{10} 与 SO_2 、 NO_2 的浓度比也有所不同, 草滩差异最明显, 高压开关厂的 PM_{10} 与 SO_2 的浓度比最小, 纺织城的 PM_{10} 与 NO_2 的浓度比最小。

3 影响因素分析

一个地区的空气质量状况是受到多因素影响控制的, 主要取决于污染物的排放情况和大气扩散能力两个因素(张国勋等, 2003)。在污染源相对稳定的情况下, 污染物在大气中的扩散、迁移、流动和转化能力, 与当时的气象条件密切相关, 气象因素对大气污染物浓度的影响为多因素联合作用(彭晓武等, 2010)。Wise等发现气象条件的变化能影响美国西南部20%~50%的颗粒物浓度变化(Wise et al, 2005)。通常出现降水、风的时候, 往往有利于空气中污染物的扩散; 反之当有雾或风很小时, 往往容易导致空气污染加重。研究风向风速、降水、沙尘天气、冬季采暖等影响因素对控制城市空气质量的大气污染具有重要作用。

3.1 风向风速

风向风速对大气污染物扩散起着很重要的作用, 是影响空气污染的主要气象条件。风向是指风吹来的方向, 它决定污染物输送的方向。根据对2010—2012年西安市风向数据的统计, 风向分布以东北风(33.75~56.25)为主, 占19.7%, 夏冬两季所占比例为24.3%、19.3%, 北东北—东东北(11.3~78.7)风频高达43.74%; 其次是西西南(236.2~258.7), 风频为14.1%, 夏冬两季所占比例为17.4%、11.1%; 最少风向方位为西西北—北(281.2~360.0), 频率为0。西安市工业区大部分处于市区西南方向, 因此在有风条件下, 市区空气污染受东北风向的影响较小, 但对位于市区西南方向的长安区等郊区影响较大; 市区空气污染受西西南风向的影响较大, 西南方向的大批工业区所产生的污染物会在西西南风向作用下向市区扩散。但根据所进行的风向与污染物浓度 Pearson 相关性分析显示, 风向与 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的浓度相关性不明显。

风速是指单位时间内空气在水平方向上运动的距离, 它决定大气稀释扩散能力的大小(陈万隆和肖静玢, 1995; 杨文峰, 2001)。风速小, 空气污染就重, 风速大, 空气污染就轻。通常风速在 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 空气污染最严重(静风时, 如果没有乱流混合, 空气污染不一定是最重); 风速在 $2\sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 随着风速加大, 空气污染逐渐减轻(蒋宁洁和周宏仓, 2009)。西安市三年平均风速为 $1.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中0级风($0\sim 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)天数共128天, 占11.7%, 1级风($0.3\sim 1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)天数886天, 占80.9%, 2级风($1.6\sim 3.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)天数81天, 占7.4%。夏季风速高于冬季, 夏季平均风速为 $1.3\sim 1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 秋冬季平均风速为 $1.1\sim 1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过统计2010—2012不同风速条件下污染物的浓度状况与风速等级的关系显示, 有风天气的污染状况小于无风天气, 随着风力的增强, 空气污染物浓度越低, 相对应的空气质量越好。风级越高, 空气质量达到国家二级标准或一级标准的比例越高。如表4所示, 风级为2的总天数为81天, 风级为2时达到国家二级空气质量的天数为63天, 对应的达标比例高达77.8%, 而0级和1级对应的达标比例小于风级为2的比例, 分别为70.3%、76.5%。此外为了研究风速对不同污染物影响的差异性, 同时去除其他影响因子的干扰,

对风速与污染物浓度进行偏相关分析(偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量相关时,将第三个变量的影响剔除,只分析另外两个变量之间相关程度的过程)。结果显示,风速与PM₁₀、SO₂和NO₂的相关系数分别是-0.071($p < 0.05$)、-0.083($p < 0.05$)、-0.142($p < 0.05$),风速与NO₂的相

关性最强。风速与PM₁₀浓度的相关性,随着风速的增大逐渐增强。风速为1.6~3.3 m·s⁻¹,偏相关分析显示,风速与PM₁₀的浓度呈现正相关($r=0.51$, $p < 0.05$),这是因为大风引发的地面扬尘等原因造成的PM₁₀的浓度升高,此风速下未检测到风速与SO₂和NO₂相关性($p > 0.05$)。

表4 不同风力条件下空气质量状况

Table 4 The air quality level in different weed speed

风级*	风速(m·s ⁻¹)	总天数	空气质量天数		比例
0	0~0.2	128	I级	5	3.9%
			II级	90	70.3%
1	0.3~1.5	886	I级	59	6.66%
			II级	678	76.5%
2	1.6~3.3	81	I级	8	9.88%
			II级	63	77.8%

* 中国气象局, http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxw/2011xqxyw/201407/t20140718_252716.html

3.2 降雨量

降雨对空气污染起到冲洗和净化作用,起到清除颗粒物的作用(王润鹿,1981;蒋维楣,2003)。降雨的净化作用与降雨量和降雨持续时间相关联,雨水量大、持续时间长,净化作用就越明显,反之,则没有净化作用,甚至会加重污染。根据对2010—2012西安市日降雨量数据的统计,三年降雨总天数207天,年平均降雨天数69天,占全年天数18.9%,降雨最多的年份是2011年(77天),最少年是2012年(64天),以小雨为主,降雨量集中在0.1~9.9 mm的降水天数占总降水天数的比例高达73.4%。降雨的季节分布主要集中在5—10月,占全年降雨总天数91.3%。降雨天的空气质量高于非降雨天,降雨天三种污染物均达到国家二级标准的天数高达198天,占94.2%,远

高于年平均水平。表5统计了2010—2012降雨前后SO₂、NO₂、PM₁₀三种污染物浓度变化。结果显示,降雨对空气污染物的去除具有明显效用,随着降雨强度的增强,空气污染程度不断下降,空气质量达标天数逐渐增多,降雨强度达到大雨或暴雨以上,降雨对污染物的去除效率会趋于稳定,约为77.80%。此外,为了研究相同降雨条件下降雨对不同污染物的去除效果是否存在差异性,同时统计了不同污染物随降雨强度增强的去除效率。结果显示,降雨对PM₁₀的去除效果最明显(小雨:84.7%;中雨:77.8%;大雨:77.8%),NO₂次之(小雨69.4%;中雨:69.4%;大雨:77.8%),对SO₂影响最小(小雨:62.5%;中雨:50.0%;大雨:77.8%),小雨更有利于PM₁₀污染程度的降低。

表5 不同降雨强度下空气质量状况

Table 5 The air quality level in different rainfall

降雨量*	总天数	达标天数		达标率	去除率		
		二级	一级	二级及以上	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀
0.1~9.9 mm	152	144	22	94.7%	62.5%	69.4%	84.7%
10.0~24.9 mm	44	43	8	97.7%	50.0%	69.4%	77.8%
25.0~49.9 mm	10	10	7	100%	77.8%	77.8%	77.8%
50.0~99.9 mm	1	1	0	100%			

* 中国气象局, http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2012zhuant/20120928_1_1_1/2010052703/201212/t20121212_195616.html

降雨天气风速、风向、温度、相对湿度等气象因子也会对污染物浓度的降低具有一定的贡献作用, 偏相关分析显示降雨量与 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 偏相关系数分别为 -0.156 ($p < 0.05$), -0.166 ($p < 0.05$), -0.265 ($p < 0.05$), 与降雨对污染物浓度去除效果的排序相符合。对中雨 (10.0~24.9 mm) 进行的降雨量与 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 偏相关分析结果显示, 降雨量与 NO_2 的相关系数 ($r = -0.430$, $p < 0.05$) 大于降雨量与 PM_{10} 的相关系数 ($r = -0.430$, $p < 0.05$)。小雨时 (0.1~9.9 mm) 降雨量与三种污染物浓度不相关 ($p > 0.05$)。大雨天数 (25.0~49.9 mm) 过少, 未检测到雨量与 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 等污染物的相关性。

3.3 沙尘等特殊天气

沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。历史上西安各月都有沙尘天气出现, 但发生的次数有明显的季节差异, 除沙尘暴天气仅出现在春季的3—5月外, 浮尘、扬沙天气一年四季都会出现, 春季和冬季浮尘天气多于扬沙, 而夏季和秋季则扬沙天气多于浮尘 (宁海文等, 2005)。区域性沙尘暴对春季 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度有很

大影响 (Abdeen et al, 2014)。沙尘天气会使空气污染加剧, 强沙尘暴过程会使 PM_{10} 浓度在非常短的时间内提高3倍左右, 造成严重的颗粒物污染 (王建鹏等, 2004)。空气中高浓度的悬浮颗粒物, 在静风、逆温等特殊的气象条件相互作用, 易导致雾霾天气的发生, 具体表现为区域性或大范围内的空气质量恶化 (王淑英等, 2003)。表6统计了2010—2012年西安市部分沙尘天气发生前后空气污染物 PM_{10} 浓度的变化情况。2010-4-26—30的沙尘天气使 PM_{10} 日浓度提高了 $214.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是沙尘天气发生前浓度的3.27倍, SO_2 和 NO_2 浓度出现不同程度的负增长。由于受甘肃省河西和中北部地区近9年来最强的一次沙尘暴天气的影响, 2010-4-26西安市当日 PM_{10} 日浓度更是高达 $574.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是沙尘天气发生前一天日浓度 $140.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的4.1倍。2012-12-12—17 PM_{10} 日浓度提高了 $249.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是雾霾天气发生前浓度的2.7倍, SO_2 和 NO_2 浓度增长不显著。受静风、逆温等天气条件的影响, 2012-1-1的 PM_{10} 日浓度达到 $362.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 8时、14时能见度只有0.6 km、0.8 km, 属于重度雾霾。

表6 2010—2012年西安市部分特殊天气空气质量状况表

Table 6 The concentration of PM_{10} increase in the fog and haze or desert storm weather from 2010 to 2012 in Xi'an

发生时间段	平均浓度 ^a ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	发生前浓度 ^a ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	能见度 ^b (km)	平均浓度 / 发生前浓度	天气情况
2010-1-9—10	235.0	131.2	9.0	1.79	雾霾
2010-4-26—30	308.8	94.4	17.2	3.27	沙尘
2011-2-3—4	319.0	140.0	10	2.28	雾霾
2011-2-19—24	266.7	144.2	7.5	1.85	雾霾
2011-12-27—2012-1-1	251.4	122.8	2.8	2.05	雾霾
2012-12-1—4	275.4	108.7	12.5	2.53	雾霾
2012-12-12—17	397.4	148.0	5.4	2.69	雾霾

注: a 以 PM_{10} 日浓度换算得到; b 以监测 14 时 3 能见度值换算得到。

3.4 采暖季人为加重作用

西安市位于寒冷地区濒临夏热冬冷地区, 每年有长达4个月的供暖时间 (11月15日至次年的3月15日), 此阶段燃料的燃烧排放 (Li et al, 2008), 高频率的逆温天气也成为冬季空气质量出现污染 / 高污染的一个重要因素 (Xia et al, 2006; Chan and Yao, 2008)。图1选取了高压开关厂、兴庆小区、小寨等监测点三种污染物浓

度作为研究对象, 绘制了采暖季与非采暖季污染物浓度对比图。由图1可知, 三个监测点采暖季污染物浓度均高于非采暖季污染物, 小寨污染程度高于高压开关厂、兴庆小区。小寨 PM_{10} 和 SO_2 浓度变化最显著, 采暖季浓度分别是非采暖季的1.58、3.47倍, 兴庆小区 NO_2 浓度变化最显著, 采暖季浓度是非采暖季的1.68倍, 且采暖季污染物浓度均高于国家二级空气质量标准。

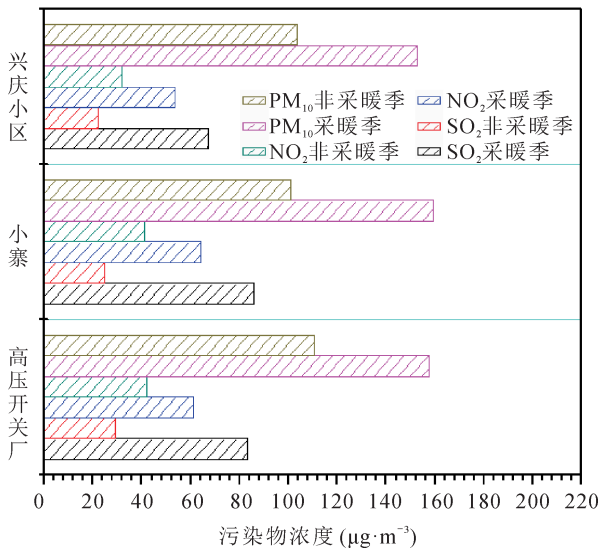


图1 采暖季与非采暖季污染物浓度对比

Fig.1 The pollutants concentration in heating and non-heating

4 结论

(1) PM₁₀ 是西安市的主要空气污染物, 其次是 NO₂、SO₂。时空分布特征显示西安市大气污染物浓度夏季最低, 冬季、春季最高; 高压开关厂、高新西区污染较重, 草滩、兴庆小区污染较轻。

(2) SO₂ 污染严重状况呈下降趋势, NO₂ 和 PM₁₀ 污染程度呈先下降后增高的趋势。

(3) 降雨量、风向风速、沙尘天气都能影响环境空气质量。NO₂ 与风向风速的相关性最强; 降雨与污染物浓度呈负相关, 降雨量越大, 对 NO₂ 和 SO₂ 的去除效率越大, 小雨时更有利于 PM₁₀ 的去除; 扬尘天气会使 PM₁₀ 浓度剧增 4 倍左右, 但对 SO₂ 和 NO₂ 浓度没有太大的影响。

(4) 采暖季污染重于非采暖季, 其中 SO₂ 的浓度受采暖的影响最大, 其次是 PM₁₀, NO₂ 受采暖因素的影响最小。

参考文献

- 陈万隆, 肖静玢. 1995. 混合层厚度、风速、和稳定度对地面 SO₂ 浓度分布影响的数值实验 [J]. *南京气象学院报*, 18(4): 548-554. [Chen W L, Xiao J F. 1995. Numerical experiment with effect of mixed layer depth, wind and stability on surface SO₂ concentration in city of Yinchuan [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 18(4): 548-554.]
- 蒋宁洁, 周宏仓. 2009. 西安市大气中 SO₂ 污染特征研究 [C]// 第 26 届中国气象学会年会论文集, 418-433.

- [Jiang N J, Zhong H C. 2009. A study on the pollution characteristic of SO₂ in Xi'an city [C]// The 26th Chinese Meteorological Society Annual Meeting Proceedings, 418-433.]
- 蒋维楣. 2003. 空气污染气象学 [M]. 南京: 南京大学出版社, 13-14. [Jiang W M. 2003. Air pollution meteorology [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 13-14.]
- 宁海文, 王式功, 杜继稳. 2005. 西安沙尘天气特征及其对空气质量的影响 [J]. *中国沙漠*, 25(6): 886-890. [Ning H W, Wang S G, Du J W. 2005. Characteristics of sand-dust events and their influence on air quality of Xi'an city [J]. *Journal of desert research*, 25(6): 886-890.]
- 彭晓武, 相红, 陈惠明, 等. 2010. 广州市部分气象因素与大气中 SO₂ 等污染物浓度的关系 [J]. *环境与健康杂志*, 27(12): 1095-1097. [Peng X W, Xiang H, Cheng H M, et al. 2010. The relationship between the concentration of SO₂ and meteorological factors and air pollutants in Guangzhou City [J]. *Journal of Environment and Health*, 27(12): 1095-1097.]
- 邵天杰, 赵景波, 马莉. 2008. 西安空气污染物时空变化特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 22(7): 77-83. [Shao T J, Zhao J B, Ma L. 2008. Analysis on spatiotemporal change of air pollutants over Xi'an city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 22(7): 77-83.]
- 沈振兴, 霍宗权, 韩月梅, 等. 2009. 采暖期和非采暖期西安大气颗粒物中水溶性组分的化学特征 [J]. *高原气象*, 28(1): 151-158. [Shen Z X, Huo Z Q, Han Y, et al. 2009. Chemical composition of water soluble ions in aerosols over Xi'an in heating and non-heating seasons [J]. *Plateau Meteorology*, 28(1): 151-158.]
- 王建鹏, 王式功, 孟小绒, 等. 2004. 沙尘天气等对西安市空气污染影响的研究 [J]. *中国沙漠*, 24(5): 558-564. [Wang J P, Wang S G, Meng X R, et al. 2004. Sand-dust events and their influence on air quality of Xi'an city [J]. *Journal of desert research*, 24(5): 558-564.]
- 王润鹿. 1981. 实用污染气象学 [M]. 北京: 气象出版社. [Wang R L. 1981. The utility pollution meteorology [M]. Beijing: Meteorological Press.]
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析 [J]. *气象科技*, 31(2): 109-114. [Wang S Y, Zhang X L, Xu X F, 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. *Meteorological Science and Technology*,

- 31(2): 109–114.]
- 杨文峰. 2001. 西安市 SO₂ 污染气象预报条件及浓度预报方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学. [Yang W F. 2001. Study of SO₂ pollution weather conditions and density forecast method of Xi'an City [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology.]
- 张国勋, 陈超, 王成臣. 2003. 气象因素对杭州城市空气质量的影响 [J]. *干旱环境监测*, 17(3): 147–148. [Zhang G X, Chen C, Wang C C. 2003. Effect of meteorology factors on city air quality in Hangzhou [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 17(3): 147–148.]
- Abdeen Z, Qasrawi R, Heo J, et al. 2014. Spatial and temporal variation in fine particulate matter mass and chemical composition: The Middle East Consortium for Aerosol Research Study [J/OL]. *The Scientific World Journal*, Vol 2014, Article ID 878704, 16 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/878704>.
- Chan C K, Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 42(1): 1–42.
- Cheung H C, Wang T, Baumann K, et al. 2005. Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of Southern China [J]. *Atmospheric Environment*, 39(34): 6463–6474.
- IPCC: Fourth Assessment Report. 2007. The Physical Science Basis, Working Group I, Final Report, Geneva, Switzerland [OL]. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- Li J, Zhuang G S, Huang K, et al. 2008. Characteristics and sources of air-borne particulate in Urumqi, China, the upstream area of Asia dust [J]. *Atmospheric Environment*, 42(4): 776–787.
- Pope C A, Dockery D W. 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect [J]. *Journal of the air and waste management association*, 56(6): 709–742.
- Sacks J D, Stanek LW, Luben T J, et al. 2011. Particulate matter induced health effects: Who is susceptible? [J]. *Environmental Health Perspectives*, 119(4): 446–454.
- Watson J G. 2002. Visibility: Science and regulation [J]. *Journal of the air and waste management association*, 52(6): 628–713.
- Wise E K, Comrie A C. 2005. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 39: 2969–2980.
- Xia X A, Chen H B, Wang P C, et al. 2006. Variation of column integrated aerosol properties in a Chinese urban region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05204.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. *Atmospheric Chemical and Physics*, 12: 779–799.