

汾渭平原采暖期与非采暖期大气环境质量 时空变化特征研究*

王 圣¹ 徐静馨¹ 孙雪丽¹ 胡正新² 赵秀勇¹

(1. 国电环境保护研究院, 江苏 南京 210031; 2. 江苏省工业和信息化厅, 江苏 南京 210008)

摘要 采暖期重污染天气频发, 成为大气环境质量改善的难点。汾渭平原刚被划为中国环境治理的重点区域, 大气污染形势十分严峻。基于 2014—2018 年 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO 等污染物监测数据及空气质量指数, 分析了汾渭平原采暖期和非采暖期大气环境质量的时空变化特征。结果表明: (1) 采暖期 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度均高于非采暖期, 非采暖期 $PM_{2.5}$ 相比采暖期低 42%~54%, 采暖期 SO_2 、 NO_2 和 CO 的平均浓度分别是非采暖期的 2.7、1.5、1.6 倍, 而非采暖期 O_3 平均浓度是采暖期的 2.2 倍; (2) $PM_{2.5}$ 和 SO_2 为采暖期首要污染物, O_3 为非采暖期首要污染物; (3) 采暖期和非采暖期三省交界处和临汾的 $PM_{2.5}$ 浓度均较高, 采暖期气态污染物的空间分布与非采暖期基本相似, 其中 SO_2 浓度的空间分布为山西境内>河南境内>陕西境内; (4) 采暖期 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 、 NO_2 、CO 浓度均呈正相关, 与 O_3 呈负相关, 非采暖期 SO_2 、 NO_2 和 CO 随 $PM_{2.5}$ 浓度呈一致变化趋势, 均先上升后下降, 与采暖期的变化趋势并不相同; (5) 采暖对 $PM_{2.5}$ 和 SO_2 的年平均贡献率分别为 34.9% 和 42.1%。

关键词 汾渭平原 采暖期 非采暖期 $PM_{2.5}$ 气态污染物 时空变化

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.12.013

Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Fenwei Plain during heating and non-heating seasons WANG Sheng¹, XU Jingxin¹, SUN Xueli¹, HU Zhengxin², ZHAO Xiuyong¹. (1. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing Jiangsu 210031; 2. Industry and Information Technology Department of Jiangsu, Nanjing Jiangsu 210008)

Abstract: The high occurrence frequencies of heavy pollution during heating season become a significant issue to improve the quality of atmospheric environment. Recently the Fenwei Plain has been brought into the national air pollution area due to its serious air pollution. Based on the 2014-2018 monitoring data of main pollutants ($PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 and CO) concentrations and air quality index (AQI), the spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Fenwei Plain during heating and non-heating seasons were analyzed. The results showed that the mass concentrations of $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 and CO in heating season were all higher than those in non-heating season. $PM_{2.5}$ concentration decreased within the range of 42% to 54% in non-heating season compared to heating season. The average concentrations of SO_2 , NO_2 and CO in heating season were 2.7, 1.5 and 1.6 times of those in non-heating season, respectively, while the average concentration of O_3 in non-heating season was 2.2 times of that in heating season. $PM_{2.5}$ and SO_2 were the primary pollutants during heating season while O_3 during non-heating season. Linfen and the neighboring cities of three provinces in Fenwei Plain had larger concentrations of $PM_{2.5}$ during heating and non-heating seasons. The spatial distribution of gaseous pollutants in heating season were similar to those in non-heating season, and the spatial distribution of SO_2 concentration showed obvious variation, which was highest in Shanxi, middle in Henan, lowest in Shaanxi. SO_2 , NO_2 and CO were positively correlated with $PM_{2.5}$, however, O_3 showed a negative correlation with $PM_{2.5}$ in the heating season. SO_2 , NO_2 and CO showed the same trends (rose first and then fell) with $PM_{2.5}$ variations in non-heating season, which were different from the trends of heating season. The annual contribution ratios of heating to $PM_{2.5}$ and SO_2 were still high, and the average values were 34.9% and 42.1%, respectively.

Keywords: Fenwei Plain; heating season; non-heating season; $PM_{2.5}$; gaseous pollutant; spatial-temporal variation

由于城市供暖需求增加, 以燃煤为主的供暖方式排放的气态污染物、烟尘等也同步增加^[1-3], 加上秋冬季逆温、静风等不利气象条件作为诱因, 导致我国重点地区雾霾天气频发, 大气污染形势严峻^[4], 对

第一作者: 王 圣, 男, 1973 年生, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事电力环境保护研究。

* 国家自然科学基金资助项目(No.41771498); 生态环境部 2018 年度燃煤大气污染防治技术政策研究专项(No.2018A030)。

人体健康、生态系统平衡、气候等产生一定的负效应^[5],因此研究采暖对大气环境质量的影响具有现实意义。

汾渭平原作为我国第四大平原,PM_{2.5}年均值达68 μg/m³,是我国空气污染最严重的区域之一,2018年被生态环境部首次划为“蓝天保卫战”治理重点区域^[6]。该地区地形狭长且山脉众多,生态环境较脆弱;产业结构层次偏低,能源结构以煤炭为主导;不仅PM_{2.5}污染形势严峻,其他气态污染物如SO₂、O₃问题也十分突出^{[7]75-77}。之前针对采暖期大气环境的研究主要集中在我国北方地区:唐山采暖期PM_{2.5}浓度升高约20%,NO、SO₂平均浓度升高约1.5倍^{[8]1878-1879};哈尔滨冬季采暖期以PM_{2.5}污染为主^[9];沈阳采暖期大气中总悬浮颗粒物的40%来自燃煤^[10];京津冀地区采暖期PM_{2.5}质量浓度为113 μg/m³,是非采暖期的1.98倍,且散煤燃烧对PM_{2.5}贡献较大^{[11]、[12]26-27}。目前国内外有关汾渭平原采暖期的大气环境质量研究报道较少。

鉴于此,本研究基于2014—2018年国家环境空气质量监测数据,对汾渭平原采暖期和非采暖期大气环境质量情况、污染物浓度的时空变化进行分析,初步揭示该地区采暖期和非采暖期气态污染物与PM_{2.5}之间的关系,并量化估算采暖对PM_{2.5}和SO₂的贡献率,为全面认识汾渭平原大气污染特征,落实国家污染防治攻坚计划,协同区域雾霾治理提供理论依据。

1 方法

1.1 数据来源

选取汾渭平原(包括山西的吕梁、晋中、临汾、运城,河南的洛阳、三门峡,陕西的西安、咸阳、宝鸡、铜川、渭南,但不含杨凌)11个市作为研究对象。PM_{2.5}和气态污染物SO₂、NO₂、O₃和CO的监测数据及空

气质量指数(AQI)均来自于汾渭平原11个市级站点,观测时间为2014年1月1日至2018年12月31日,时间间隔为1 h。采暖期是10—12月和1—3月,非采暖期是4—9月。

1.2 计算方法

本研究采用了相对比值法估算采暖对PM_{2.5}和SO₂的贡献率,某污染物浓度相对于参考标准污染物浓度的比值稳定,意味着污染源变化不大,否则意味着污染源的构成发生了改变。非采暖期CO浓度变化较小^[13-15],因此将CO作为参考标准污染物。采暖对PM_{2.5}和SO₂浓度的影响较大,分别利用PM_{2.5}或SO₂与CO的比值分析采暖对PM_{2.5}和SO₂的贡献。

2 结果与讨论

2.1 采暖期和非采暖期空气质量情况

表1为2014—2018年汾渭平原采暖期和非采暖期不同级别天数比例(利用AQI计算)。采暖期优良率波动较大,呈现出先上升后下降又上升的趋势,2015年最高,2016年最低,2016年以后有升高趋势,上升至2018年的52.44%;重度及以上污染率与优良率趋势正好相反,从2016年的16.39%下降至2018年的9.27%。表明汾渭平原采暖期空气质量存在起伏,2016年以来优良率和重度及以上污染率分别上升和下降,空气质量有改善的趋势。

非采暖期优良率2017年最低,2018年又有上升趋势,但是与2014年相比下降了12.79个百分点;重度及以上污染率较低,但波动较大,2015年最低,2017年最高,2018年又有下降的趋势;轻、中度污染天数2018年虽有下降,但同2014年相比明显上升。总体上看,汾渭平原非采暖期空气质量并不乐观,2017年是形势较为严峻的一年。

表1 汾渭平原采暖期和非采暖期不同级别天数比例

Table 1 Statistics of percentage of different grade days during heating and non-heating seasons in Fenwei Plain

项目	不同级别天数比例/%						优良率/%	重度及以上污染率/%
	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染		
采暖期	2014年	2.95	41.29	29.29	11.66	12.69	2.13	44.24
	2015年	5.99	52.25	23.18	8.94	8.39	1.25	58.24
	2016年	4.90	38.71	26.42	13.59	12.74	3.65	43.61
	2017年	4.40	43.57	28.06	10.75	9.58	3.64	47.97
	2018年	4.36	48.08	27.47	10.81	7.53	1.74	52.44
非采暖期	2014年	11.41	66.71	18.80	2.32	0.75		78.12
	2015年	9.65	75.02	13.94	1.34	0.05		84.67
	2016年	8.79	64.48	24.39	2.24	0.10		73.27
	2017年	6.41	50.82	32.49	8.69	0.94	0.65	57.23
	2018年	15.65	49.68	29.31	5.12	0.25		65.33

非采暖期与采暖期相比,非采暖期空气质量明显优于采暖期。但2016年以后,非采暖期优良率与采暖期相比差距缩小,轻度污染率反超采暖期,但重度及以上污染率明显低于采暖期。

2.2 采暖期和非采暖期 $PM_{2.5}$ 和气态污染物浓度的时间变化

2.2.1 年变化

由图1可见,采暖期与非采暖期的 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度均超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级限值($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$),与采暖期相比,非采暖期低42%~54%。汾渭平原采暖期 $PM_{2.5}$ 浓度明显高于非采暖期,采暖是造成冬季雾霾天气的重要原因之一,这与北方地区的情况相似^{[12]30-32}。由图2可见,采暖期 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度也均高于非采暖期,其中 SO_2 平均浓度大幅度高于非采暖期,是非采暖期的2.7倍; NO_2 和 CO 平均浓度分别是非采暖期的1.5、1.6倍。可见, $PM_{2.5}$ 和 SO_2 是采暖期的年首要污染物。 NO_2 和 CO 浓度在采暖期也有不同程度升高,与之前的研究结果相似,均认为采暖期大气污染物浓度明显高于非采暖期^[16]。燃煤不仅排放

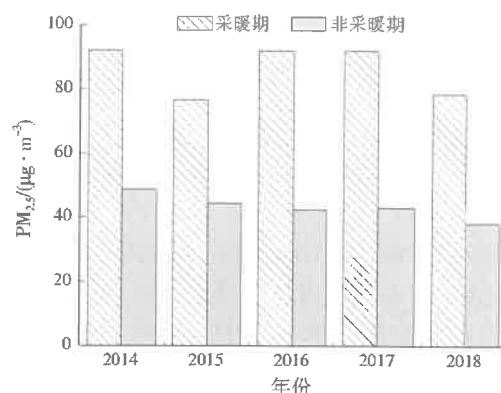


图1 汾渭平原采暖期和非采暖期 $PM_{2.5}$ 质量浓度的年变化
Fig.1 Annual mass concentrations variations of $PM_{2.5}$ during heating and non-heating seasons in Fenwei Plain

SO_2 和烟尘,还排放 NO_x 、 CO 等污染物,因此采暖期大量燃煤同时也导致 NO_x 和 CO 浓度增加^[17]。此外,采暖期和非采暖期 O_3 浓度的变化与其他3种气态污染物相反,在非采暖期大幅度升高,平均浓度是采暖期的2.2倍,表明 O_3 是非采暖期的年首要污染物。2016年 SO_2 浓度最高可能是造成该年采暖期空气质量较差的原因。且2016年采暖期降水较

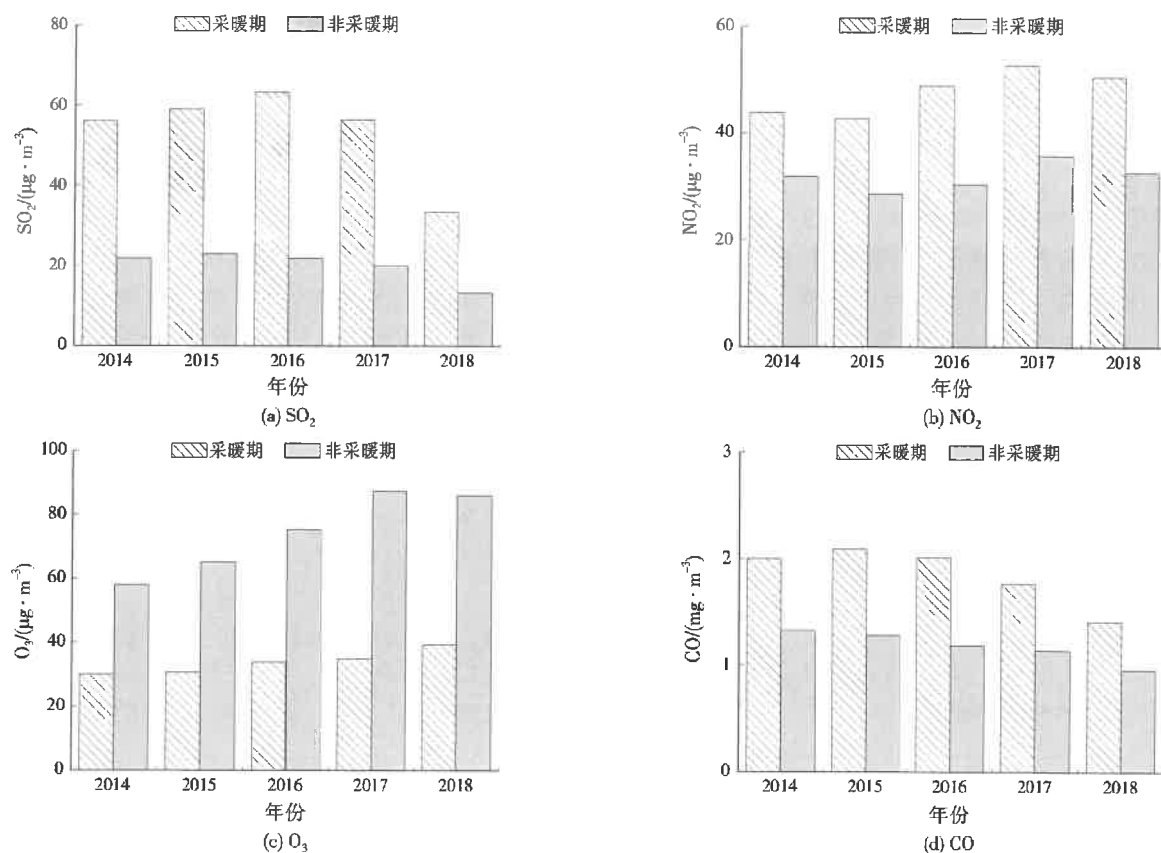


图2 汾渭平原采暖期和非采暖期气态污染物质量浓度的年变化

Fig.2 Annual mass concentrations variations of gaseous pollutants during heating and non-heating seasons in Fenwei Plain

少,由于东亚地区冬季季风减弱,增暖效应显著^[18-20],从而导致大气扩散条件较差,SO₂干湿沉降速率较慢,造成 SO₂ 浓度较高。2017 年非采暖期 NO₂ 和 O₃ 浓度均处于 5 年中最高值,同时 PM_{2.5} 的浓度也很高,可能是造成当年 AQI 较大的原因。非采暖期 NO₂ 浓度较高可能是由于汾渭平原作为晋陕两省经济较为发达的地区,快速增长的交通运输导致;O₃ 浓度较高是因为非采暖期处于 4—9 月,此时的太阳辐射较充沛,利于 O₃ 的形成^[21],有研究也指出北方城市 O₃ 浓度呈倒 V 型,夏季达到峰值^[22],且其前体物 NO₂ 浓度较高,也有利于 O₃ 的生成。

2.2.2 日变化

总体上看,除 O₃ 浓度外,采暖期小时值明显高于非采暖期(见图 3)。PM_{2.5} 为采暖期日首要污染物,有研究指出采暖期 PM_{2.5} 浓度主要受燃煤供暖影响^[23]。采暖期 PM_{2.5} 呈现双峰变化趋势,在 11:00 和 22:00 附近出现明显的峰值,且夜间的峰值略高于中午;SO₂ 也是采暖期的日首要污染物,其日变化趋势与 PM_{2.5} 相似,峰值时段也一致,表明采暖期 PM_{2.5} 的日变化可能受到 SO₂ 日变化的影响;NO₂、CO 日变化也呈现出双峰趋势,但均没有 PM_{2.5} 和 SO₂ 明显,均在上午 9:00 出现峰值,这可能与机动车尾气排放有关,随后由于 O₃ 浓度迅速升高及边界层抬升,NO₂ 浓度逐渐降低,在 15:00 时达到谷值;O₃ 浓度受到了 NO₂ 浓度变化影响,与 NO₂ 呈现出反向关系。随着太阳辐射增强和温度升高,NO₂ 浓度进一步累积,光化学反应持续进行,在 NO₂ 浓度达到谷值 1 h 后(16:00),O₃ 浓度达到了峰值,这与之前的研究结果^[24-25] 基本一致。随后太阳辐射减弱,O₃ 光化学反应开始降低,伴随着近地面沉降作用,O₃ 浓度逐渐降低。O₃ 为非采暖期的日首要污染

物,其中 SO₂ 日变化与采暖期略有不同,呈现出单峰变化趋势。

2.3 采暖期和非采暖期 PM_{2.5} 和 气态 污染物 浓度的 空间 变化

从 PM_{2.5} 空间分布看出,采暖期 PM_{2.5} 浓度高值区主要位于汾渭平原的南部(咸阳、西安、渭南、洛阳一带),位于三省交界处且地理距离接近,平均 PM_{2.5} 质量浓度高达 92~100 μg/m³,污染形势严峻,这与杨乐超等^{[7]85-86} 对汾渭平原雾霾时空特征的研究结果一致;临汾和吕梁交界处 PM_{2.5} 浓度也较高;而晋中、宝鸡、铜川的 PM_{2.5} 浓度较低,远离三省交界的中心区域。非采暖期 PM_{2.5} 浓度高值区主要位于三省交界处及临汾和吕梁交界处;宝鸡、铜川、西安的 PM_{2.5} 浓度较低。由此可见,采暖期和非采暖期三省交界处及临汾和吕梁交界处的 PM_{2.5} 浓度均较高。需要指出的是,由于利用离散站点数据进行插值会带来一些误差和不确定性^[26],采暖期和非采暖期临汾和吕梁交界处的 PM_{2.5} 高值区很可能主要受到临汾高 PM_{2.5} 浓度的影响。

表 2 至表 5 展现了 2014—2018 年汾渭平原各城市采暖期气态污染物分布。尽管晋中、吕梁和运城缺乏 2014 年的数据,仍可以看出采暖期位于山西境内的 4 个市 SO₂ 浓度较高,其中临汾 5 年 SO₂ 质量浓度平均值超过 100 μg/m³;河南境内的两个市 SO₂ 浓度次之;陕西境内的 5 个市最低。采暖期 NO₂ 浓度西安最高,其次是渭南和咸阳,均位于陕西境内。采暖期 O₃ 浓度铜川最高,其次是位于河南的两个市及临汾。采暖期 CO 浓度临汾最高,5 年 CO 质量浓度平均值达到 2.7 mg/m³。研究表明,CO 浓度升高,会消耗大气中的 ·OH,减弱大气氧化能力,从而影响光化学反应^[27]。

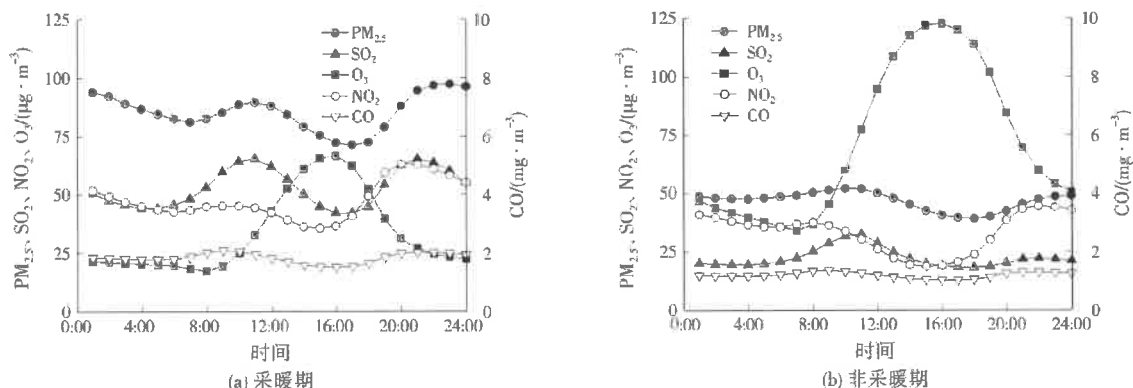


图 3 汾渭平原采暖期和非采暖期 PM_{2.5} 及气态污染物质量浓度的日变化
Fig.3 Diurnal mass concentrations variations of PM_{2.5} and gaseous pollutants during heating and non-heating seasons in Fenwei Plain

表 2 汾渭平原各城市采暖期 SO₂ 质量浓度分布Table 2 Distribution of SO₂ mass concentrations during heating season in cities of Fenwei Plain $\mu\text{g}/\text{m}^3$

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	36.7	50.6	53.4	49.4	40.8	65.7	76.7	75.9			
2015	20.0	36.9	31.5	34.5	27.8	60.8	60.1	101.3	94.5	108.2	72.9
2016	20.3	32.4	30.9	28.0	22.3	50.5	42.8	130.5	97.9	140.3	98.5
2017	17.3	29.1	23.5	26.4	25.9	31.0	28.5	124.6	105.3	132.0	77.0
2018	13.7	27.3	17.1	19.1	19.6	21.4	19.2	69.2	59.1	56.5	44.6

表 3 汾渭平原各城市采暖期 NO₂ 质量浓度分布Table 3 Distribution of NO₂ mass concentrations during heating season in cities of Fenwei Plain $\mu\text{g}/\text{m}^3$

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	40.5	44.3	44.7	53.0	40.9	45.8	49.9	31.5			
2015	41.9	41.9	46.1	49.2	43.2	54.2	50.0	41.4	25.9	36.3	39.0
2016	47.8	43.5	56.8	61.3	60.3	56.2	46.3	43.2	28.2	42.8	50.1
2017	49.3	43.1	65.0	69.1	61.4	51.9	49.7	46.3	46.1	50.8	46.7
2018	47.0	44.2	59.8	65.0	58.5	50.7	44.1	49.0	44.8	52.3	40.8

表 4 汾渭平原各城市采暖期 O₃ 质量浓度分布Table 4 Distribution of O₃ mass concentrations during heating season in cities of Fenwei Plain $\mu\text{g}/\text{m}^3$

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	30.4	42.1	24.4	20.9	25.4	31.1	32.4	33.0			
2015	25.6	44.7	28.9	22.6	25.7	32.0	35.6	33.5	23.5	25.7	37.7
2016	31.7	51.6	32.7	26.4	29.0	37.7	40.4	34.3	21.1	28.1	40.3
2017	31.1	44.1	27.9	27.6	31.5	35.9	37.2	37.0	28.3	36.1	47.2
2018	37.1	49.9	32.1	32.4	35.0	37.2	43.9	41.5	31.4	39.3	52.2

表 5 汾渭平原各城市采暖期 CO 质量浓度分布

Table 5 Distribution of CO mass concentrations during heating season in cities of Fenwei Plain mg/m^3

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	2.2	2.1	1.3	2.2	1.6	2.0	1.8	2.7	2.6		
2015	1.8	1.6	1.5	2.2	1.5	2.2	1.8	3.0	3.2	1.9	2.3
2016	1.5	1.5	1.7	2.1	1.6	2.2	1.9	3.2	1.9	2.0	2.6
2017	1.3	1.6	1.4	1.9	1.7	1.7	1.4	2.6	1.9	1.8	2.2
2018	1.0	1.4	1.1	1.5	1.4	1.3	1.1	2.0	1.5	1.4	1.6

表 6 汾渭平原各城市非采暖期 SO₂ 质量浓度分布Table 6 Distribution of SO₂ mass concentrations during non-heating season in cities of Fenwei Plain $\mu\text{g}/\text{m}^3$

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	10.7	12.9	17.0	12.9	19.6	29.2	31.0	42.2			
2015	7.2	10.1	13.9	12.5	18.6	26.7	29.1	23.9	41.1	35.0	34.3
2016	6.4	12.7	13.4	11.1	17.7	24.6	22.9	35.1	26.8	36.0	33.9
2017	7.5	11.6	12.0	11.6	16.7	19.3	14.9	33.8	30.4	35.2	26.1
2018	5.1	13.5	8.8	9.7	11.6	15.6	10.2	21.4	18.8	15.6	13.8

表 7 汾渭平原各城市非采暖期 NO₂ 质量浓度分布Table 7 Distribution of NO₂ mass concentrations during non-heating season in cities of Fenwei Plain $\mu\text{g}/\text{m}^3$

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	28.4	29.7	30.7	37.1	32.6	39.4	25.3	31.8			
2015	28.5	26.5	33.8	37.4	31.3	30.3	29.6	24.6	26.1	27.0	19.7
2016	30.6	26.9	35.4	44.0	38.1	34.6	30.4	24.1	21.2	28.3	20.7
2017	33.3	25.9	42.7	48.6	45.6	31.9	32.7	28.2	45.2	36.6	22.6
2018	32.0	26.9	36.2	41.6	38.3	32.5	29.9	28.4	41.0	33.3	19.3

非采暖期气态污染物的空间分布(见表 6 至表 9)与采暖期基本相似。其中,非采暖期 SO₂、NO₂ 和 CO 浓度不及采暖期,但 O₃ 浓度则高于采暖期。汾

渭平原非采暖期 SO₂ 浓度的空间分布也表现为山西境内>河南境内>陕西境内,这与山西能源结构中煤炭占比较大有关;西安 NO₂ 浓度最高,可能与该

表 8 汾渭平原各城市非采暖期 O₃ 质量浓度分布

Table 8 Distribution of O₃ mass concentrations during non-heating season in cities of Fenwei Plain $\mu\text{g}/\text{m}^3$

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	52.6	66.7	54.1	50.6	49.2	69.5	73.3	48.7			
2015	58.6	67.2	64.0	61.1	62.5	70.7	79.7	56.4	52.3	59.1	85.0
2016	69.8	92.4	81.6	71.5	76.7	92.2	89.7	65.0	47.9	75.8	66.0
2017	69.4	86.0	80.5	74.3	79.8	98.2	93.8	104.1	61.8	95.8	117.6
2018	63.2	86.6	79.0	76.3	83.8	91.1	89.6	102.4	67.7	93.0	113.8

表 9 汾渭平原各城市非采暖期 CO 质量浓度分布

Table 9 Distribution of CO mass concentrations during non-heating season in cities of Fenwei Plain mg/m^3

年份	宝鸡	铜川	渭南	西安	咸阳	洛阳	三门峡	临汾	吕梁	晋中	运城
2014	1.4	1.1	0.7	1.4	1.0	1.8	1.1	2.1			
2015	1.0	0.8	0.8	1.3	1.0	1.6	1.1	1.7	2.3	0.9	1.7
2016	0.7	0.8	0.8	1.1	1.1	1.8	1.2	1.9	1.2	0.8	1.5
2017	0.8	1.2	0.8	1.1	1.2	1.3	0.9	1.6	1.2	1.2	1.2
2018	0.6	1.2	0.6	1.0	0.9	1.2	0.8	1.3	1.2	0.9	0.9

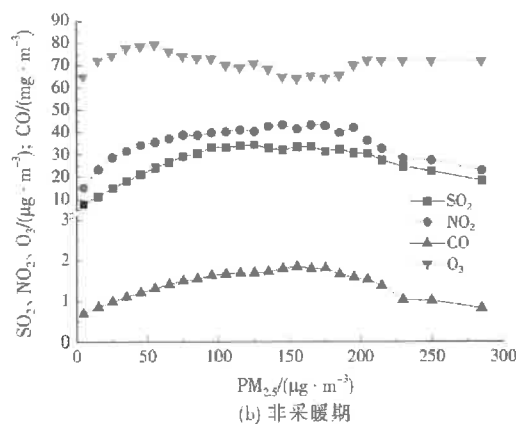
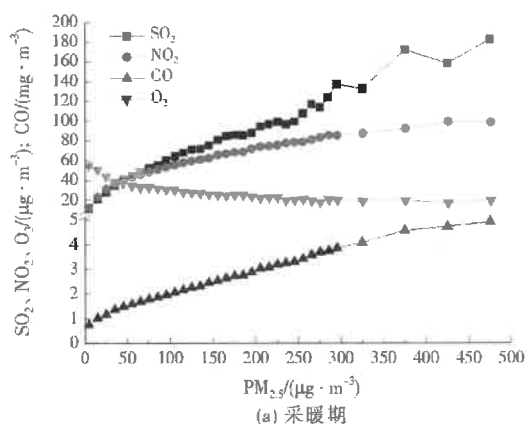


图 4 汾渭平原采暖期和非采暖期气态污染物与 PM_{2.5} 质量浓度的关系

Fig.4 The relationship between gaseous pollutants and PM_{2.5} mass concentrations during heating and non-heating seasons in Fenwei Plain

城市汽车尾气大量排放有关;整个区域均处于 O₃ 高浓度状态;CO 在采暖期的平均浓度约是非采暖期的 1.5 倍,这与周瑞等^{[8]1879-1880}的研究结果相近。

2.4 采暖期和非采暖期气态污染物与 PM_{2.5} 的关系

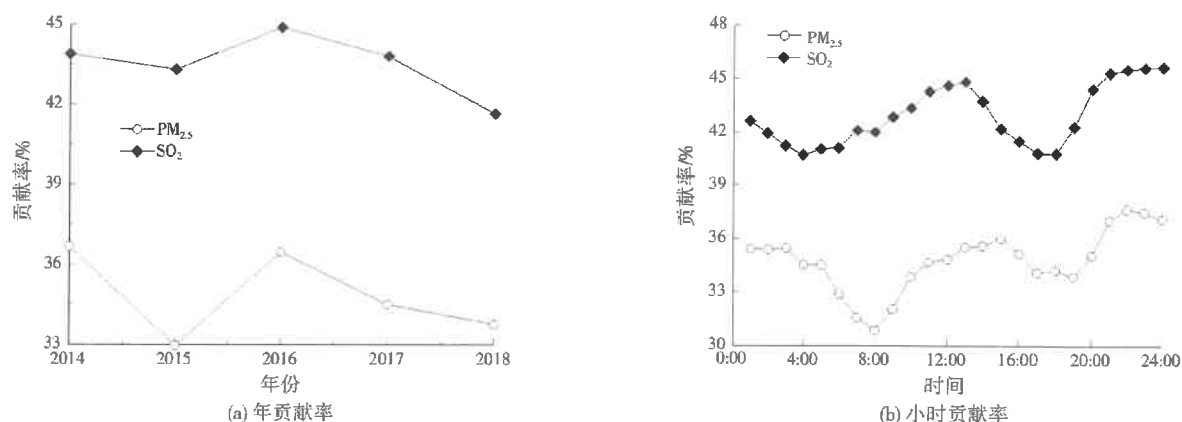
从图 4(a)可以看出,采暖期 SO₂、NO₂ 和 CO 与 PM_{2.5} 的增减呈一致变化趋势。在 PM_{2.5} 质量浓度 < 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,SO₂、NO₂ 和 CO 随着 PM_{2.5} 浓度的增加均表现出近似直线的快速上升趋势,其中 SO₂ 的上升速率最快;O₃ 则随着 PM_{2.5} 浓度增加呈快速下降趋势。当 PM_{2.5} 质量浓度由 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加至接近 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,SO₂、NO₂ 和 CO 仍随着 PM_{2.5} 浓度的增加呈现上升趋势,但上升较为平缓,O₃ 浓度变化不大。由此可见,采暖期 PM_{2.5} 与 O₃ 浓度呈负相关,与除 O₃ 以外的的气态污染物浓度呈正相关。采暖期煤炭的燃烧会直接产生大量的颗粒物、SO₂、NO_x 和 CO 等,如果气象条件适宜会使 SO₂ 和 NO₂

等气体通过气相、液相或非均相转化等方式生成硫酸盐和硝酸盐等二次颗粒物,从而导致 PM_{2.5} 浓度增加^[28]。

从图 4(b)可以看出,非采暖期 SO₂、NO₂ 和 CO 随 PM_{2.5} 浓度增加也呈一致的变化趋势,均先上升后下降,与采暖期的趋势并不相同。在 PM_{2.5} 质量浓度 < 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,SO₂、NO₂ 和 CO 随着 PM_{2.5} 浓度的增加均呈现出快速上升趋势;当 PM_{2.5} 质量浓度从 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 增加至接近 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,呈现出快速下降的趋势。当 PM_{2.5} 质量浓度 < 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时 O₃ 快速上升,当 PM_{2.5} 为 50~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时 O₃ 快速下降;当 PM_{2.5} 为 150~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, O₃ 浓度又上升;当 PM_{2.5} 质量浓度 > 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, O₃ 浓度基本保持不变。

2.5 采暖对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的贡献率分析

从图 5(a)可以看出,采暖对 PM_{2.5} 的年贡献率

图5 汾渭平原采暖对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的贡献率Fig.5 Contribution ratios of heating to PM_{2.5} and SO₂ in Fenwei Plain

在 2015 年最低(33.0%),在 2014 年最高(36.5%),年平均贡献率为 34.9%;对 SO₂ 的年贡献率在 2018 年最低(39.6%),2016 年最高(44.8%),年平均贡献率为 42.1%;2016 年以来对采暖对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的贡献率均缓慢下降。可见,汾渭平原采暖对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的贡献率仍较高,其中采暖对 SO₂ 的贡献率高于 PM_{2.5},与采暖期燃煤产生大量 SO₂ 有关;2016 年以来情况有所好转。

从图 5(b)可以看出,小时贡献率高值主要集中在 12:00 至 16:00 及 22:00 至 24:00。PM_{2.5} 和 SO₂ 白天(8:00 至 18:00)的贡献率分别为 30.8%~36.0%和 40.8%~44.8%,夜间(1:00 至 7:00 及 19:00 至 24:00)贡献率分别为 31.6%~37.7%和 40.7%~45.6%,夜间贡献率略高于白天。

3 结论与建议

(1) 汾渭平原采暖期空气质量存在起伏,2016 年以来优良率和重度及以上污染率分别上升和下降,表明汾渭平原采暖期空气质量治理取得一定成效;汾渭平原非采暖期空气质量明显优于采暖期,但并不乐观,表明非采暖期的空气污染治理工作也不容松懈。

(2) 汾渭平原非采暖期 PM_{2.5} 浓度比采暖期整体低 42%~54%;采暖期 SO₂、NO₂ 和 CO 平均浓度分别是非采暖期的 2.7、1.5 和 1.6 倍;PM_{2.5} 和 SO₂ 是采暖期首要污染物。煤炭燃烧是造成汾渭平原采暖期环境变差的主要原因,因此煤改气、煤改电都是可以采取的措施;此外,散烧煤供暖对环境污染影响很大,因此散煤治理问题是解决采暖期大气污染问题的重中之重。非采暖期 O₃ 平均浓度是采暖期的 2.2 倍,是首要污染物。非采暖期太阳辐射较为充

沛,更利于前体物 NO_x 或挥发性有机物通过光化学反应生成 O₃。O₃ 前体物主要来源于机动车尾气的排放,因此加强机动车排放源的控制是解决非采暖期大气环境问题的关键,机动车尾气排放后处理技术的改进、低污染燃料的开发、电动车的推广都是可行措施。

(3) 汾渭平原采暖期和非采暖期三省交界处 PM_{2.5} 浓度较高;采暖期 SO₂ 浓度的空间分布为山西境内>河南境内>陕西境内。汾渭平原大气环境治理需要注意周边区域的影响,加强区域间的联防联控,打破行政区域界限;此外,临汾的大气污染问题十分突出,需要重点治理,采取强有力的措施。

(4) 汾渭平原采暖期 PM_{2.5} 与 SO₂、NO₂、CO 的浓度变化呈正相关,与 O₃ 呈负相关。非采暖期 SO₂、NO₂ 和 CO 随 PM_{2.5} 浓度呈一致的变化趋势。PM_{2.5} 浓度与气态污染物浓度的关系十分密切,气态污染物可通过一系列化学反应向 PM_{2.5} 转化,而 PM_{2.5} 是造成雾霾污染天气的最主要因素,因此有效控制气态污染物的排放,对控制汾渭平原频发的雾霾天气极为重要。

(5) 汾渭平原地区采暖对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的贡献率仍较高,其中对 SO₂ 的贡献率高于 PM_{2.5},2016 年以来贡献率缓慢下降。2016 年以来采暖对 PM_{2.5} 和 SO₂ 的贡献有好转,但仍需加大治理措施的施行力度,调整和优化该区域能源结构。12:00 至 16:00 及 22:00 至 24:00 贡献率较高,且夜间贡献率略高于白天,表明应加强夜间污染企业的运行管理和环境监督。

参考文献:

[1] SUN Y, WANG Y S, ZHANG C C. Measurement of the verti-

- cal profile of atmospheric SO₂ during the heating period in Beijing on days of high air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(2): 468-472.
- [2] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 630-635.
- [3] 陈静. 采暖期与非采暖期大气的首要污染物浓度的区域分布特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [4] 王圣. 减缓重点地区采暖期大气污染的能源方案思考[J]. 环境保护, 2018, 46(19): 16-19.
- [5] WANG J D, ZHAO B, WANG S X, et al. Particulate matter pollution over China and the effects of control policies[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584/585: 426-447.
- [6] 卫玮, 王黎娟, 靳泽, 等. 基于 OMI 数据汾渭平原大气 SO₂ 时空分布特征分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2276-2283.
- [7] 杨乐超, 董雪丽, 徐波. 汾渭平原雾霾时空变化特征及其溢出效应[J]. 环境经济研究, 2018(3).
- [8] 周瑞, 辛金元, 邢立亭, 等. 唐山工业新区冬季采暖期大气污染变化特征研究[J]. 环境科学, 2011, 32(7).
- [9] 黄丽坤, 王广智, 王琨, 等. 哈尔滨市采暖与非采暖期大气颗粒物污染特性研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 146-150.
- [10] 李岚, 张凯, 关建华, 等. 沈阳地区采暖期气候特征与节能预报技术研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(1): 152-156.
- [11] LI X, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Source contributions of urban PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region: changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology[J]. Atmospheric Environment, 2015, 123: 229-239.
- [12] 解淑艳, 王帅, 张霞, 等. 中国北方地区采暖期颗粒物污染现状[J]. 中国环境监测, 2018, 34(4).
- [13] HAN L, ZHUANG G, SUN Y, et al. Local and non-local sources of airborne particulate pollution at Beijing - the ratio of Mg/Al as an element tracer for estimating the contributions of mineral aerosols from outside Beijing[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2005, 48(3): 253-264.
- [14] 王哲, 王自发, 郑海涛. 一种评估烟花爆竹燃放对大气 PM_{2.5} 影响的新方法[J]. 中国环境监测, 2014, 30(3): 31-36.
- [15] 胡丙鑫, 段青春, 刘世杰, 等. 2018 年春节期间京津冀及周边地区烟花燃放效果评估[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 203-211.
- [16] 徐艳娟. 冬季供暖对中国北方空气质量的影响——基于断电回归和固定效应模型的证据[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [17] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 燃煤电厂氮氧化物产生浓度影响因素的敏感性和相关性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2303-2309.
- [18] 刘芷君, 王体健, 谢曼, 等. 东亚地区冬季风对气溶胶传输和分布的影响研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2015, 51(3): 575-586.
- [19] CALKINS C, GE C, WANG J, et al. Effects of meteorological conditions on sulfur dioxide air pollution in the North China plain during winters of 2006-2015[J]. Atmospheric Environment, 2016, 147: 296-309.
- [20] VAN D J, MIJLING B, DING J, et al. Cleaning up the air: effectiveness of air quality policy for SO₂ and NO_x emissions in China[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2017, 17(3): 1-18.
- [21] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 146-152.
- [22] 张祥志, 陈文泰, 黄樱, 等. 江苏省 2013—2016 年臭氧时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 50-59.
- [23] 薛亦峰, 闫静, 魏小强. 燃煤控制对北京市空气质量的改善分析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(3): 253-258.
- [24] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3001-3008.
- [25] 陶双成, 邓顺熙, 高硕哈, 等. 北京采暖期典型区域环境空气污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1741-1747.
- [26] 张海平, 周星星, 代文. 空间插值方法的适用性分析初探[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(6): 14-18.
- [27] 薛敏, 王跃思, 孙扬, 等. 北京市大气中 CO 的浓度变化监测分析[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 200-206.
- [28] 张晶晶, 张清花. 昌吉市采暖期和非采暖期 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染特征分析[J]. 干旱环境监测, 2018, 32(1): 24-28.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2019-06-17)

(上接第 1436 页)

- [6] 黄永炳, 李晓娟, 王丽丽, 等. 铁改性锰矿对砷的吸附性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(9): 115-119.
- [7] 黄永炳, 王丽丽, 李晓娟, 等. 砷形态转化及其环境效应研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(1): 16-19.
- [8] HUANG Y B, NIU C Y, QIU Q, et al. Study on the removal performance of natural manganese ore and iron-oxidizing bacteria on the arsenic[J]. Journal of Residuals Science and Technology, 2017, 14(1): 379-386.
- [9] HUANG Y B, LIU X Y, WANG L L, et al. Study on arsenic removal efficiency and mechanism of titanium modified manganese ore[J]. Advanced Materials Research, 2012, 356/360: 1061-1065.
- [10] LIU Z M, CHEN J T, WU Y C. Synthesis of magnetic orderly mesoporous α -Fe₂(O₃)₂ nanocluster derived from MIL-100(Fe) for rapid and efficient arsenic(III, V) removal[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 343(9): 304-314.
- [11] 赵安珍, 徐仁扣. 二氧化锰对 As(III) 的氧化及其对针铁矿去除水体中 As(III) 的影响[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(4): 252-253.
- [12] 梁慧峰, 马子川, 张杰, 等. 新生态二氧化锰对水中三价砷去除作用的研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(3): 168-171.
- [13] 李杰, 李金成, 李伟, 等. 氢氧化铁对水中砷的吸附试验研究[J]. 供水技术, 2010, 4(5): 17-20.
- [14] 孙媛媛, 曾希柏, 白玲玉. Mg/Al 双金属氧化物对 As(V) 吸附性能的研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1377-1385.
- [15] 王姣姣, 崔岩山, 崔宜文, 等. MnO₂ 对水体中 As(III)、As(V) 的吸附性能[J]. 环境化学, 2014, 33(7): 1123-1129.
- [16] HALTER W E, PFEIFER H R. Arsenic(V) adsorption onto α -Al₂O₃ between 25 and 70°C[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(10): 793-802.
- [17] NAKAMOTO K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds[M]. New York: John Wiley, 1997.
- [18] 张昱, 豆小敏, 杨敏, 等. 砷在金属氧化物/水界面上的吸附机制 I. 金属表面羟基的表征和作用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10): 1586-1591.
- [19] LIN L N, QIU W W, WANG D, et al. Arsenic removal in aqueous solution by a novel Fe-Mn modified biochar composite: characterization and mechanism[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 144(10): 514-521.

编辑: 黄苇 (收稿日期: 2019-03-18)