

中国北方典型中小盆地城市大气颗粒物污染特征及趋势对比

彭洁¹, 董发勤^{1,2}, 霍婷婷¹, 李海龙¹, 李冬坤¹

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 分析了2014~2018年北方5个典型中小盆地城市(兰州、银川、临汾、太原、南阳)PM₁₀与PM_{2.5}的浓度变化特征和大致来源类型。除2018年银川PM_{2.5}浓度外,各市PM₁₀和PM_{2.5}年均浓度均超标;兰州、银川和南阳PM₁₀与PM_{2.5}呈逐年下降趋势,南阳下降最明显;临汾PM₁₀与PM_{2.5}呈逐年上升趋势;太原PM₁₀与PM_{2.5}稳定维持在一个高浓度状态。5个城市颗粒物浓度的季节变化特征一致:冬春高、夏秋低。对PM_{2.5}/PM₁₀值而言,冬季和夏季该比值较高,分别受取暖和降水的影响;春季和秋季该比值较低,分别受沙尘和秸秆焚烧及高强度建筑施工的影响。5市PM_{2.5}和PM₁₀浓度具有良好的线性关系,细颗粒占比大小顺序为临汾>南阳>太原>银川>兰州。

关键词: 中小盆地城市; 粗颗粒物; 细颗粒物; 变化特征

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)01-0105-08

Pollution characteristics and trend comparison of atmospheric particles in the typical small-medium basin cities of northern China

PENG Jie¹, DONG Fa-qin^{1,2}, HUO Ting-ting¹, LI Hai-long¹ and LI Dong-kun¹

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Mianyang 621010, China)

Abstract: This study focused on the variation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations and general source types in 2014 ~ 2018 in five typical small-medium basin cities (Lanzhou, Yinchuan, Linfen, Taiyuan and Nanyang) in northern China. Apart from the PM_{2.5} concentrations in 2018 in Yinchuan, the PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in the other cities are above the level of the 2nd grade standard of the state; The PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations show a downward trend year by year, with the most obvious city being Nanyang; The PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations show an increasing trend year by year in Linfen; The PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations are stable at a high level in Taiyuan. Seasonal variation characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations are similar: high concentrations in winter and spring, low in summer and autumn. The ratios of PM_{2.5}/PM₁₀ are greater in winter and summer, resulting from the heating process and frequent rainfall, respectively. The ratios are lower in spring and autumn, resulting from sandstorms and frequent straw combustion as well as high-strength construction of building, respectively. The PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations have a good linear relationship, The proportion of fine particles is in order of Linfen > Nanyang > Taiyuan > Yinchuan > Lanzhou.

收稿日期: 2019-08-30; 接受日期: 2019-12-11; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(4183000171); 西南科技大学龙山人才计划(18lx651); 西南科技大学博士基金(18zx7156)

作者简介: 彭洁(1994-), 女, 汉族, 硕士研究生, 环境工程专业, E-mail: 952667489@qq.com; 通讯作者: 董发勤(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事环境矿物学和生态环境协调材料研究, E-mail: fqdong2004@163.com.

Key words: small-medium basin cities; PM_{10} ; $PM_{2.5}$; variation characteristics

Fund support: National Natural Science Fund Project (4183000171); Longshan Talent Plan of Southwest University of Science and Technology (18lx651); Doctoral Fund of Southwest University of Science and Technology (18zx7156)

近年来,随着我国经济的快速发展及城市化进程加剧,大气气溶胶的污染状况日益严重,中国严重的气溶胶污染问题已越来越引起全世界的广泛关注(肖悦等, 2018)。基于2016年中国361个城市空气质量数据分析,发现全国空气质量在空间变化上整体呈现出由南到北逐渐下降的趋势, PM_{10} (粗颗粒物)与 $PM_{2.5}$ (细颗粒物)成为北方城市气溶胶污染的罪魁祸首(彭艳梅等, 2013; 郑润琴, 2015)。 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 对人体和环境的危害很大,尤其是 $PM_{2.5}$,能够通过鼻腔进入人体肺泡和血液中,对呼吸系统、心血管等系统产生不利影响,从而诱发各种呼吸道疾病和癌症(Kong *et al.*, 2013)。气溶胶颗粒物还能吸收和散射太阳光线,减小地球表面的热通量,降低能见度,导致灰霾现象日益增多等。因此,开展大气颗粒物污染特征,找寻大气颗粒物污染变化规律,对进一步研究气溶胶颗粒物污染具有重要意义。

近年来,许多学者对城市环境空气中大气颗粒物的污染及变化进行了研究。大气颗粒物可以经历成核、凝结、化学老化、溶解-沉淀等大气过程,产生复杂的多组分气溶胶,还会引发非均相化学反应(An *et al.*, 2013)。颗粒物中的矿物颗粒作为大气环境中最活跃的气溶胶粒子(Sosso *et al.*, 2016),既是大气颗粒物的重要组成,又可以为二次颗粒物的形成提供活性场所。Duan等(2006)在对北京市 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征的研究中发现,细颗粒物浓度2月和10月为全年最高,白天 $PM_{2.5}$ 质量浓度显著低于夜间,且 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 日均浓度变化均呈现“W”型。细颗粒物与可吸入颗粒物浓度比值为冬季最高而春季最低,这可能是由于北方城市冬季采暖对细颗粒物的贡献更大,春季多沙尘天气而对粗颗粒物的贡献更为明显(杨复沫等, 2002)。兰州 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 超标率分别为32.3%~167.7%和23.1%~48.0%,其中细颗粒物在粗颗粒物中的占比一直高于60%,细颗粒物污染状况严重(瞿德业等, 2013)。冬季贵阳城区的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度较郊区更高,相关性分析发现二者污染来源大致相同(王永红等, 2016)。

随着《环境空气质量标准》(GB3095-2012)、《大气污染防治行动计划》即“大气十条”、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等一系列大气污染防治措施的出台,我国大气污染防治总体上成效显著,2017年全国338个地级及以上城市可吸入颗粒物平均浓度比2013年下降22.7%,京津冀、长三角、珠三角区域细颗粒物平均浓度比2013年分别下降39.6%、34.3%、27.7%。但我国北方中西部地区颗粒物污染形势仍然不容乐观,较严重的污染主要集中在盆地城市,包括兰州、银川、临汾、太原、南阳。2016年,兰州、银川、临汾、太原 $PM_{2.5}$ 浓度相比2015年上升了3.8%、9.8%、25.4%、6.5%,其中,临汾继2016年 $PM_{2.5}$ 不降反升、未达到年度目标后,2017年 $PM_{2.5}$ 年均浓度继续上升12%至 $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (亚洲清洁空气中心, 2016^①);南阳市受益地形以及城市自身发展的影响,从2013年以来雾霾次数不断增多,持续时间不断增长,据当地环境公报显示,细颗粒物是南阳的首要污染物,其次为可吸入颗粒物(尹延震等, 2018)。

目前,对大气颗粒物污染特征的研究常是局限于单个城市或特定时段的污染特征,结合盆地地形、多年度及多个城市的系统分析研究尚不多见。本研究选取兰州、银川、临汾、太原、南阳5个城市作为我国北方中小型盆地城市代表,利用中国空气质量在线监测分析平台发布的数据,分析5个城市2014~2018年 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度变化规律,并初步探讨造成其浓度变化差异的原因,建立 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的相关性分析回归方程式,以反映其 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的污染状况以及整体污染趋势,为全面衡量其 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 污染情况提供理论支持。

1 数据来源与评价标准

1.1 数据来源

数据来源于中国空气质量在线监测分析平台,网址 <https://www.aqistudy.cn/historydata/monthda->

① 亚洲清洁空气中心. 2016. 大气中国: 中国大气污染防治进程.

ta.php? city = 。

1.2 评价标准

执行《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 二级标准, $PM_{2.5}$ 日均浓度值标准为 $75 \mu g/m^3$, 年均浓度值标准为 $35 \mu g/m^3$; PM_{10} 日均浓度值标准为 $150 \mu g/m^3$, 年均浓度值标准为 $70 \mu g/m^3$ 。

2 2014 ~ 2018 年颗粒物超标状况

2.1 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度超标率分析

如图 1 所示, 2014 ~ 2018 年除 2018 年银川 $PM_{2.5}$ 浓度达标之外, 其余情况均超标。通过对比

PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度超标率, 发现兰州和银川 PM_{10} 浓度超标率高于 $PM_{2.5}$ 浓度超标率, 兰州 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度超标率总体呈递减的趋势, 银川 PM_{10} 浓度超标率总体呈递减趋势, 而 $PM_{2.5}$ 浓度超标率不降反增; 临汾和南阳 $PM_{2.5}$ 浓度超标率高于 PM_{10} 浓度超标率, 南阳 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度超标率总体呈逐年递减趋势, 2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度超标率出现回升; 临汾 PM_{10} 呈逐年递增趋势; 临汾 $PM_{2.5}$ 、太原 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度超标率波动不大, 逐年稳定维持在一个高超标率数值附近。由此可见我国北方中小盆地城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染情况还相当严峻, 不容乐观。

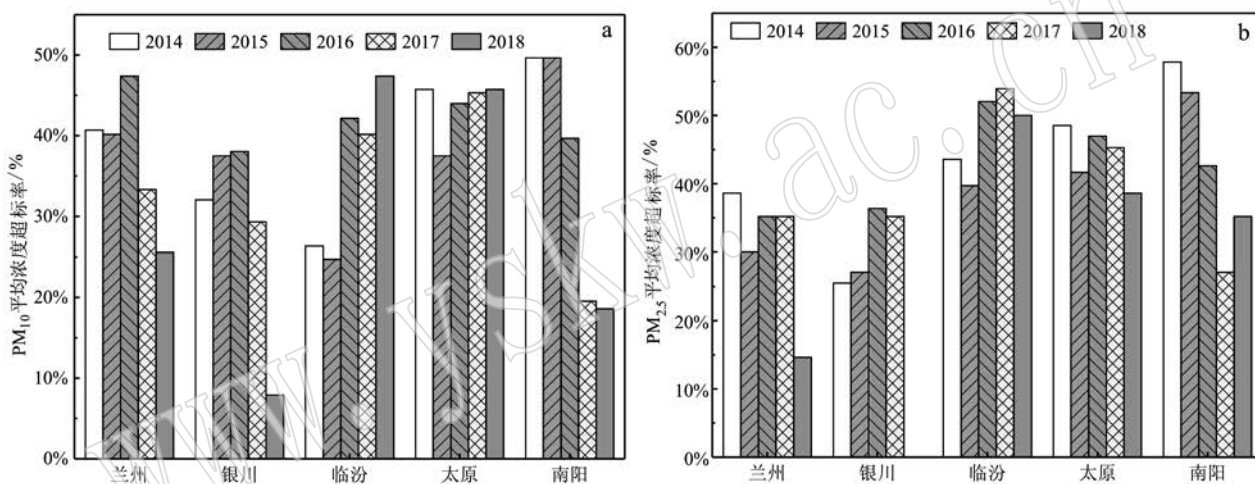


图 1 2014 ~ 2018 年兰州、银川、临汾、太原、南阳 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度超标率

Fig. 1 Excess ratio of annual average PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in the basins of Lanzhou, Yinchuan, Linfen, Taiyuan and Nanyang during 2014 ~ 2018

2.2 年均 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度超标天数分析

5 个中小盆地城市 2014 ~ 2018 年 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度超标天数如表 1。由表 1 可知, 2014 ~ 2018 年 5 个小盆地城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度超标天数在 12 至 152 天不等, 5 年内 PM_{10} 平均超标天数比率(剔除无效数据后, 超标天数/全年总监测天数即为一年的超

标天数比率, 再取 5 年的平均值)为: 兰州 18.92%、银川 13.80%、临汾 17.76%、太原 28.36%、南阳 24.66%, 5 年内 $PM_{2.5}$ 平均超标天数比率为: 兰州 14.50%、银川 11.90%、临汾 29.1%、太原 29.66%、南阳 29.60%, 由此可见, 我国北方 5 个中小盆地城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染天数均占据相当大的比例, 大气

表 1 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 浓度超标天数

天

Table 1 The number of days when PM_{10} and $PM_{2.5}$ exceeded the standard

	2014 年			2015 年			2016 年			2017 年			2018 年		
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	无效天数	PM_{10}	$PM_{2.5}$	无效天数	PM_{10}	$PM_{2.5}$	无效天数	PM_{10}	$PM_{2.5}$	无效天数	PM_{10}	$PM_{2.5}$	无效天数
兰州	69	67	-	77	50	-	92	69	-	61	34	27	37	37	40
银川	52	44	-	68	41	-	71	70	-	46	47	20	12	12	12
临汾	32	107	-	52	88	-	77	96	-	74	120	12	89	120	-
太原	115	152	-	79	105	-	93	103	-	104	87	9	122	90	6
南阳	139	152	23	122	147	-	95	92	-	40	56	39	38	72	20

颗粒物污染态势不容忽视。

3 颗粒物浓度的时间变化特征

3.1 年变化特征

如图2所示,5个城市空气质量总体偏差。2014~2018年5市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度变化特征具有明显的差异,兰州、银川和南阳 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度整体呈逐年下降趋势,南阳下降最明显,与2014年相比,南阳2018年 PM_{10} 浓度下降36.88%、 $PM_{2.5}$ 浓度下降34.85%,说明南阳颗粒物污染治理成效显著,这得益于2013年来国家实施的一系列大气污染防治措施,不断强化对机动车尾气、工业废气、道路和工地扬尘、燃煤锅炉等方面的治理(陈芳等,2019)。临汾 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度总体呈逐年上升趋势,相比2014年,2018年 PM_{10} 浓度上升了30.10%、 $PM_{2.5}$ 浓度上升13.02%;太原 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度一直维持在一个高浓度状态。污染形势最为严峻的临汾和太原都位于山西省,山西作为煤炭大省,又是我国重要的能源重化工基地,煤炭冶金、机械等支柱性产业在生产过程中排放出大量的颗粒物,导致严重的空气污染(闫雨龙等,2010)。2017年1月初山西全省开始实施“煤改电”,这一举措虽很有意义,但环境治理成效缓慢。

3.2 月变化特征

如图3所示,5个城市 PM_{10} 月均浓度在65~

195.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间, $PM_{2.5}$ 月均浓度在30.6~131.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的月变化趋势相同,1~3月、11~12月维持在一个高浓度水平,4~10月浓度较低,呈两边高、中间低的“U”型分布。从四季划分看,1、2、12月属冬季,3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季。5个城市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度峰值主要出现在1月、11月、12月(冬),夏、秋季颗粒物污染较轻,不同于胥密等(2016)报道的北京市全年污染最严重的月份出现在2月,5~9月污染较轻,与Chai等(2014)研究的北方城市颗粒物浓度的峰值出现在1月一致。

由图3可直观发现 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的浓度呈现冬季高,夏秋低。冬季峰值的出现说明北方冬季燃煤供暖是造成该季节颗粒物污染严重的主要因素。另一方面,冬季大气层结趋于稳定,边界层和气温低,降水少,静稳天气多,加之盆地环境较为封闭,易形成逆温层,而不利于污染物扩散,使污染物积累增多,因此,冬季成为我国灰霾高发的主要季节。夏、秋季北方降水增多,空气湿度增大,大气湿沉降增多,污染物来源量减小(相对于冬季),空气质量自然相对较好。就 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 月均浓度的分布而言,高浓度值主要出现在冬季。因此冬季应成为颗粒物污染的严控时段(薛国强等,2014)。

3.3 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度比值

$PM_{2.5}/PM_{10}$ 值代表 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的含量,是反映地区粗细颗粒物分布特征、来源的重要指标。 $PM_{2.5}$

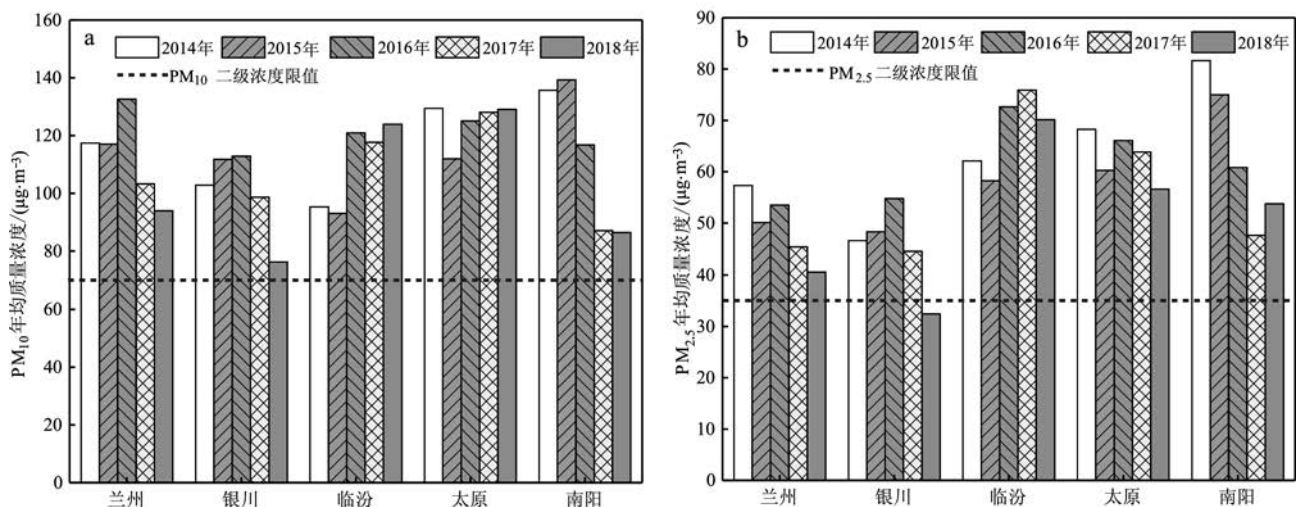


图2 2014~2018年兰州、银川、临汾、太原、南阳 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年平均浓度

Fig. 2 Comparison of annual average PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in the basins of Lanzhou, Yinchuan, Linfen, Taiyuan and Nanyang during 2014~2018

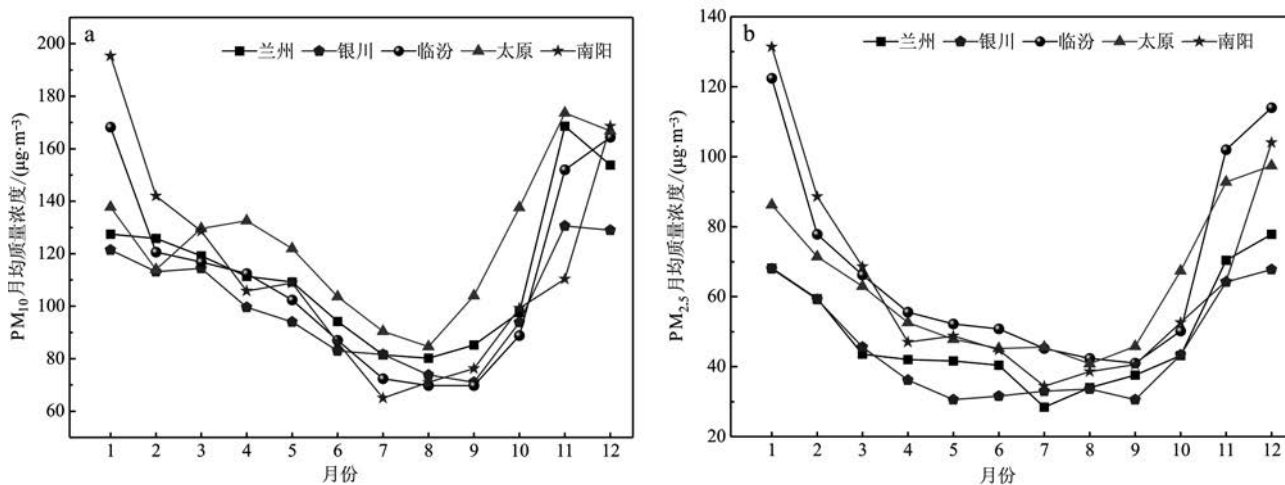


图 3 2014 ~ 2018 年兰州、银川、临汾、太原、南阳 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 月平均质量浓度变化

Fig. 3 Monthly average PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in the basins of Lanzhou, Yinchuan, Linfen, Taiyuan and Nanyang during 2014 ~ 2018

多为二次颗粒物, PM_{10} 多为一次颗粒物(王涛等, 2017)。由图 4 可知, 临汾、南阳 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值最高分别为 0.57 ~ 0.65、0.52 ~ 0.62, 均大于 0.5 (过半), 说明临汾和南阳细颗粒物污染更为严重; 临汾 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值呈反复波动的年变化趋势, 2014 年最大, 为 0.65; 南阳 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值呈“U”型变化趋势, 2018 年最高, 为 0.62。太原 2017 年以前以细颗粒

物污染为主, 之后以粗颗粒物污染为主。兰州和银川 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值均低于 0.5, 说明两市颗粒物污染以粗颗粒物为主。由图 5 可知, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值峰值主要出现在 1 月、2 月、7 月、11 月、12 月(冬、夏), $PM_{2.5}/PM_{10}$ 谷值出现在 4 月、10 月(春、秋)。 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值变化规律整体呈“W”型, 冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季。

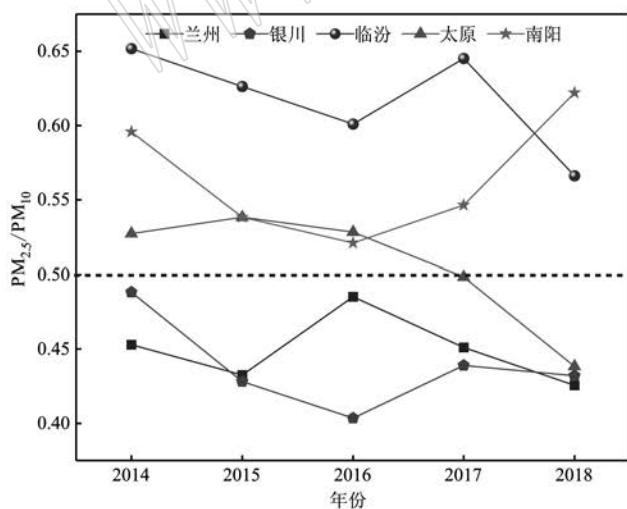


图 4 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度比值逐年变化

Fig. 4 The variation of ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ year by year

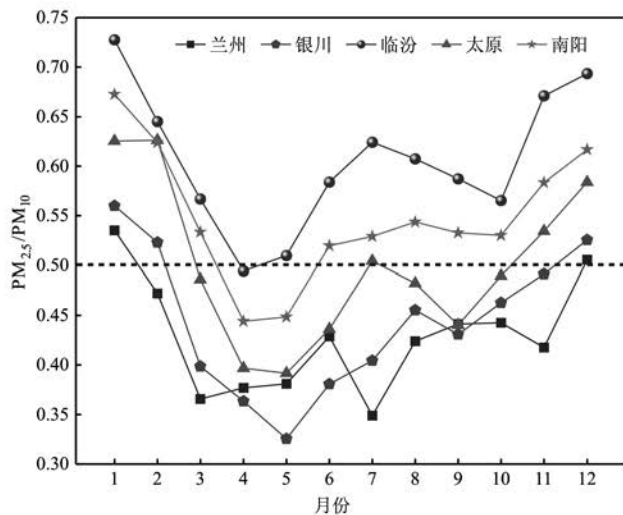


图 5 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度比值逐月变化

Fig. 5 The variation of ratio of $PM_{2.5}/PM_{10}$ month by month

春秋两季浓度比值较低是因为春季受风沙扬尘影响较大, 沙尘主要是粒径大于 $2.5 \mu m$ 的粗颗粒物; 秋季受建筑施工影响, 项目为赶在冬季之前完成

年度施工任务, 施工强度较大, 造成的粗颗粒物污染更为严重(郝明途等, 2006), 此外秋季正值农作物成熟时节, 秸秆焚烧现象频繁, 产生较多的 PM_{10} (黄

仁东等, 2015), 沙尘源和秸秆焚烧源显著抬升 PM_{10} 浓度, 导致 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 浓度比值降低。夏季浓度比值较高是因为夏季光化学烟雾多发, 高温和光照均有利于二次颗粒物的生成, 同时夏季雨季降水频繁, 降水对空气中 PM_{10} 的清除作用较 $PM_{2.5}$ 而言更大; 冬季浓度比值较高是因为北方冬季燃煤取暖过程排放的 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 等气态污染物通过在大气颗粒物表面发生非均相反应生成硫酸盐等二次颗粒物, 硫酸盐是大气颗粒物的主要成分之一, 占我国 $PM_{2.5}$ 含量的 10% ~ 30% (Yang *et al.*, 2011)。由于细颗粒物对人体健康的危害更大 (Ma *et al.*, 2011), 所以应重点关注大气颗粒物在冬季和夏季对北方人群的健康风险。

3.4 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 相关性分析

图 6 可见, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在良好的相

关性, 相关系数 R^2 均较高: 兰州 0.826 2、银川 0.805 9、临汾 0.936 0、太原 0.747 3、南阳 0.947 6, R^2 (南阳) > R^2 (临汾) > R^2 (兰州) > R^2 (银川) > R^2 (太原), 说明南阳市的粗细颗粒物间相关性最显著, 太原最不显著。方程斜率代表可吸入颗粒物中细粒子的含量, 它可以反映颗粒物的污染水平, 颗粒物中细颗粒占比越大, 污染水平越高。通常认为方程斜率在 30% ~ 40% 属于轻度污染, 在 50% ~ 70% 之间属重度污染 (覃国荣, 2014)。2014 ~ 2018 年间各市 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的质量载荷分别为 56.74%、65.28%、85.57%、75.06%、78.70%, 细粒子在 PM_{10} 中占据了一半以上的比重, 均为重度污染; 且各市质量载荷大小顺序为临汾 > 南阳 > 太原 > 银川 > 兰州, 即临汾市颗粒物中细颗粒物占比最大, 兰州最小。细粒子占比越大, 则对人体和环境的潜在影响就越大。

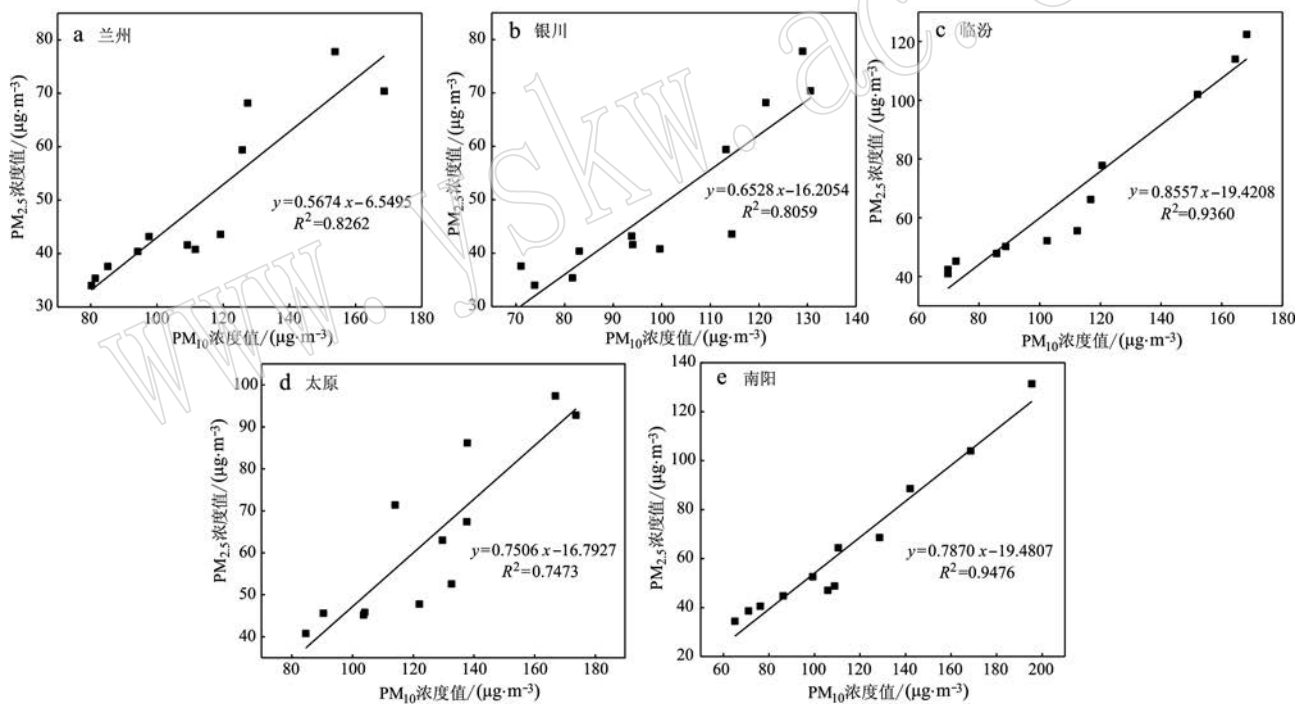


图 6 PM_{10} 浓度和 $PM_{2.5}$ 度相关回归关系

Fig. 6 Correlation and regression of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations

4 结论

我国北方 5 个典型中小盆地城市 2014 ~ 2018 年 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度变化有以下特征:

(1) 除了银川 2018 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度值达标外, 其余城市各年份 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均超过国家年

均浓度二级标准限值。兰州、银川和南阳 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 浓度呈逐年下降趋势; 南阳下降最明显; 临汾 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 浓度呈逐年上升趋势; 太原 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 稳定维持在一个高浓度状态。

(2) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的季节变化特征相同: 冬季高、夏秋低。冬季浓度高主要受冬季取暖及不利污染物扩散的气象因素影响; 春季浓度高源于北方

频繁的沙尘天气;夏秋浓度低是由于降水多,颗粒物湿沉降增多。

(3) 对 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 逐年变化而言,临汾和南阳比值最大,均大于 0.5;兰州和银川比值均小于 0.5,太原大于和小于 0.5 年份都有。 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的季节变化:冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季,冬夏季比值高受取暖和降水的影响,春秋受沙尘和秸秆焚烧及建筑施工的影响;且 5 个城市主要颗粒物污染类型不同:兰州和银川以粗颗粒物为主,临汾和南阳以细颗粒物为主,太原 2017 年之前以细颗粒物为主,之后是粗颗粒,这主要是由气候、盆地地形及人为因素共同导致。

(4) 5 个城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的相关性均良好,太原相关系数为 0.747 3,其余四季均大于 0.8,说明 $PM_{2.5}$ 为大气污染物的主要成分;各市细颗粒物占比大小顺序:临汾 > 南阳 > 太原 > 银川 > 兰州;细颗粒物占比越大,则对人体和环境的潜在影响就越大。

References

- An Junling, Li Ying, Chen Yong, *et al.* 2013. Enhancements of major aerosol components due to additional HONO sources in the North China Plain and implications for visibility and haze[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(1): 57 ~ 66.
- Chai Fahe, Gao Jian, Chen Zhengxing, *et al.* 2014. Spatial and temporal variation of particulate matter and gaseous pollutants in 26 cities in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 26(1): 75 ~ 82.
- Chen Fang, Yan Zhihui, Rao Qinghua, *et al.* 2019. Analysis on pollution characteristics of different size particles in Fuzhou[J]. *Journal of Anhui University(Natural Sciences)*, 43(3): 85 ~ 93(in Chinese with English abstract).
- Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* 2006. Concentration and chemical characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China: 2001-2002[J]. *Science of the Total Environment*, 355(1~3): 264 ~ 275.
- Hao Mingtu, Hou Wanguo, Zhou Xuehua, *et al.* 2006. Study on PM_{10} , $PM_{2.5}$ concentration level of Jinan, China[J]. *Journal of Shangdong University(Engineering Science)*, 36(3): 108 ~ 111(in Chinese with English abstract).
- Huang Rendong, Tong Huixian, Liu Kang, *et al.* 2015. Pollution characteristics concentration and forecast model for $PM_{2.5}$ in Xi'an[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 9(6): 2 974 ~ 2 978(in Chinese with English abstract).
- Kong Shaofei, Ji Yaqin, Liu Lingling, *et al.* 2013. Spatial and temporal variation of phthalic acid esters (PAEs) in atmospheric PM_{10} and $PM_{2.5}$ and the influence of ambient temperature in Tianjin, China [J]. *Atmospheric Environment*, 74: 199 ~ 208.
- Ma Yanjun, Chen Renjie, Pan Guowei, *et al.* 2011. Fine particulate air pollution and daily mortality in Shenyang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 409(13): 2 473 ~ 2 477.
- Peng Yanmei, Zhong Yuting, He Qing, *et al.* 2013. Research progress on fine particles of atmospheric aerosols[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 7(1): 69 ~ 74(in Chinese with English abstract).
- Qin Guorong. 2014. Study on Pollution Characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the City of Baoding[D]. Hebei University(in Chinese with English abstract).
- Qu Deye, Zhou Wei, Chen Leihua, *et al.* 2013. Pollution analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Urban air aerosols in Lanzhou[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(1): 70 ~ 74(in Chinese with English abstract).
- Sosso G C, Li TS, Donadio D, *et al.* 2016. Microscopic mechanism and kinetics of Ice Formation at complex interfaces: Zooming in on kaolinite[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 7(13): 2 350 ~ 2 355.
- Wang Tao, He Haoqi, Xia Zhonghuan, *et al.* 2017. Pollution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in 2015 in Nanjing, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 11(11): 5 978 ~ 5 985(in Chinese with English abstract).
- Wang Yonghong, Liu Hao and Peng Jingquan. 2016. Study on the variation characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations between urban and suburban areas of Gui Yang in winter[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 8(16): 37 ~ 39(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yue, Tian Yongzhong, Xu Wenxuan, *et al.* 2018. Study on the spatiotemporal characteristics and socioeconomic driving factors of air pollution in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 27(3): 518 ~ 526(in Chinese with English abstract).
- Xu Mi, Wang Guangpu, Shang Hongzhong, *et al.* 2016. Characteristics of mass concentration variation of $PM_{2.5}$ in Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 10(8): 4 396 ~ 4 402(in Chinese with English abstract).
- Xue Guoqiang, Zhu Bin and Wang Honglei. 2014. Size distributions and source apportionment of soluble Ions in aerosol in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 35(5): 1 633 ~ 1 643(in Chinese with English abstract).
- Yan Yulong, He Qiusheng and Qian Tianwei. 2010. Status of atmospheric pollution and optimization of monitoring sites in urban area of Taiyuan [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 31

- (5): 427~431(in Chinese with English abstract).
- Yang F, Tan J, Zhao Q, *et al.* 2011. Characteristics of $PM_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 11(11): 1 025~1 051.
- Yang Fumo, He Kebin, Ma Yongliang, *et al.* 2002. Variation characteristics of $PM_{2.5}$ concentration and its relationship with PM_{10} and TSP in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 22(6): 27~31(in Chinese with English abstract).
- Yin Yanzhen, Wang Miao, Wang Jingyuan, *et al.* 2018. The relationships of pollution characteristics of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and meteorological parameters in Nanyang City[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 32(1): 12~18(in Chinese with English abstract).
- Zheng Runqin. 2015. Research on pollution status and characteristics of $PM_{2.5}$ in northern cities[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 33(1): 121~121(in Chinese with English abstract).
- 彭艳梅, 钟玉婷, 何清, 等. 2013. 大气气溶胶细粒子研究进展[J]. *沙漠与绿洲气象*, 7(1): 69~74.
- 覃国荣. 2014. 保定市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染特征研究[D]. 河北大学.
- 瞿德业, 周 围, 陈雷华, 等. 2013. 兰州市城区空气气溶胶中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染状况分析[J]. *干旱区资源与环境*, 27(1): 70~74.
- 王 涛, 何浩奇, 夏忠欢, 等. 2017. 2015年南京市 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的污染特征[J]. *环境工程学报*, 11(11): 5 978~5 985.
- 王永红, 刘 豪, 彭景权. 2016. 贵阳市冬季 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度城郊变化特征分析[J]. *绿色科技*, 7(16): 37~39.
- 肖 悦, 田永中, 许文轩, 等. 2018. 中国城市大气污染特征及社会经济影响分析[J]. *生态环境学报*, 27(3): 518~526.
- 胥 密, 王广甫, 尚宏忠, 等. 2016. 北京市2014年 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征[J]. *环境工程学报*, 10(8): 4 396~4 402.
- 薛国强, 朱 彬, 王红磊. 2014. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. *环境科学*, 35(5): 1 633~1 643.
- 闫雨龙, 何秋生, 钱天伟. 2010. 太原市大气污染现状及监测站点优化[J]. *太原科技大学学报*, 31(5): 427~431.
- 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 2002. 北京 $PM_{2.5}$ 浓度的变化特征及其与 PM_{10} 、TSP 的关系[J]. *中国环境科学*, 22(6): 27~31.
- 尹延震, 王 苗, 王静远, 等. 2018. 南阳市 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染特征及其与气象因子的关系[J]. *干旱环境监测*, 32(1): 12~18.
- 郑润琴. 2015. 北方城市 $PM_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J]. *资源节约与环保*, 33(1): 121~121.

附中文参考文献

- 陈 芳, 颜志辉, 饶清华, 等. 2019. 福州市城区不同粒径颗粒物污染特征[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 43(3): 85~93.
- 郝明途, 侯万国, 周学华, 等. 2006. 济南市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 污染水平研究[J]. *山东大学学报(工学版)*, 36(3): 108~111.
- 黄仁东, 仝慧贤, 刘 抗, 等. 2015. 西安市 $PM_{2.5}$ 污染特征及其估测模型[J]. *环境工程学报*, 9(6): 2 974~2 978.