

黄善斌,李本轩,王文青. 济南 $PM_{2.5}$ 质量浓度与气象条件相关性初步研究[J].海洋气象学报,2020,40(1):90-97.
HUANG Shanbin, LI Benxuan, WANG Wenqing. A preliminary study on the correlation between $PM_{2.5}$ mass concentration and meteorological conditions in Jinan[J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(1):90-97. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.009.(in Chinese)

济南 $PM_{2.5}$ 质量浓度与气象条件相关性初步研究

黄善斌^{1,2},李本轩³,王文青⁴

(1. 山东省气象局,山东 济南 250031;2. 齐鲁工业大学,山东 济南 250353;3. 成武县气象局,山东 成武 274200;4. 山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031)

摘要:通过对济南2013年12月—2018年2月 $PM_{2.5}$ 质量浓度数据分析得出, $PM_{2.5}$ 质量浓度平均和最大值均为冬季最高,春秋季节次之,夏季最低; $PM_{2.5}$ 质量浓度值1月和12月最高,8月最低;其质量浓度呈明显的逐年递减趋势。在不同风向上 $PM_{2.5}$ 质量浓度存在显著差异性,在N风向和ESE(盛行)风向上均出现了质量浓度较大值,一方面与污染物的异地输送有关,另一方面与济南的特殊地形有关。研究表明,无论污染源在山脉的背风侧还是迎风侧,都很容易导致高浓度污染;尤其在冬季,山脉地形还会加重逆温影响,使污染程度加重。通过相关性研究发现,冬季、春季和秋季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与相对湿度和平均总云量均呈正相关,与日照时数及其距平呈负相关;冬季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与平均气温及其距平以及最高、最低气温均呈正相关,与平均、最高、最低气压均呈负相关;春季和秋季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与气温距平值呈正相关;夏季和秋季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与日降水量呈负相关,而且随着雨强的增大,对 $PM_{2.5}$ 的洗消作用越显著。上述变量间相关性均通过了 $P \leq 0.01$ 显著性检验。

关键词: $PM_{2.5}$ 质量浓度;变化特征;气象条件;相关性;特殊地形

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)01-0090-08

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.01.009

A preliminary study on the correlation between $PM_{2.5}$ mass concentration and meteorological conditions in Jinan

HUANG Shanbin^{1,2}, LI Benxuan³, WANG Wenqing⁴

(1. Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China; 2. Qilu University of Technology, Jinan 250353, China; 3. Chengwu Meteorological Bureau, Chengwu 274200, China; 4. Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan 250031, China)

Abstract According to the data analysis of $PM_{2.5}$ mass concentration from December 2013 to February 2018 in Jinan, the mean and maximum $PM_{2.5}$ mass concentration in winter are the highest, followed by that in spring and autumn, and the lowest is in summer; $PM_{2.5}$ mass concentration is the highest in January and December and the lowest in August; the mass concentration shows a significant decreasing trend year by year. There are significant differences in $PM_{2.5}$ mass concentration under different wind directions and higher mass concentration appears in N and ESE (prevailing) wind direction, which, on the one hand, is related to the regional transport of pollutants, and on the other hand, is related to the special topography of Jinan. The study shows whether the pollution source is on the leeward or the windward side, it is likely to cause high-concentration pollution; especially in winter, the topography of mountain will also intensify the impact of temperature inversion, aggravating the pollution. The correlation study finds in winter, spring,

收稿日期:2018-07-02; 修订日期:2019-08-18

基金项目:山东省气象局重点科研项目(2018sdqz02)

作者简介:黄善斌,男,硕士,高级工程师,主要从事应用气象、专业气象服务研究,sdzh121@126.com。

and autumn, PM_{2.5} mass concentration is positively correlated with both relative humidity and mean total cloud cover, while negatively correlated with sunshine duration and its anomaly; in winter, it is positively correlated with mean temperature and its anomaly, maximum temperature, and minimum temperature, while negatively correlated with mean, maximum, and minimum atmospheric pressure; in spring and autumn, it is positively correlated with temperature anomaly; in summer and autumn, it is negatively correlated with daily precipitation, and as rainfall intensity increases, the washing effect on PM_{2.5} is more significant. The correlation among the above variables all passes the significance test of p equal to or lower than 0.01.

Key words PM_{2.5} mass concentration; characteristics of change; meteorological condition; correlation; special topography

引言

引起全球广泛关注的大气污染事件可追溯到二十世纪中叶,如1943年美国洛杉矶化学烟雾事件,造成大多数居民患眼睛红肿、喉炎、呼吸道疾患恶化等疾病,65岁以上的老人死亡400多人^[1];1952年的“致命烟雾”在5d内造成了4000多名伦敦市民死亡^[2]。这些事件的发生都与大气中细颗粒物的污染有关^[3-4]。其中,PM_{2.5}通过对太阳辐射的吸收和散射作用破坏地表的能量收支平衡,影响地球的气候系统,降低大气能见度且危及人体健康^[5]。据徐政等^[6]研究,济南霾天气的气溶胶散射系数和吸收系数分别为非霾天气的2.6倍和2.8倍,PM_{2.5}可导致大气能见度显著降低^[7-8],严重威胁地面及航空交通安全,影响人们户外活动等。PM_{2.5}粒径细小、比表面积大、化学活性强,易于吸附重金属、微生物等有毒有害物质,且在大气中输送距离远、停留时间长,对空气质量和人体健康均能造成更大的影响^[9-10]。PM_{2.5}日均暴露每增加10 μg·m⁻³,呼吸系统疾病患病率将上升2.07%,对人体产生极大的危害^[11-12]。DOCKERY et al.^[13]研究发现,当PM₁₀浓度增加10 μg·m⁻³时,死亡率增加10%,而当PM_{2.5}的浓度增加10 μg·m⁻³时,死亡率增加14%。因此,PM_{2.5}是影响大气环境质量的重要污染物。据中国环境状况公报^[14]统计,近年来山东省烟(粉)尘排放量超过50万t·a⁻¹,灰霾天气在山东境内频发。关于山东空气污染指数(API)变化特征^[15]、山东省空气质量指数(AQI)分布特征^[16]、大气颗粒物污染^[17-18]和过程个例分析^[19]已有部分研究,而对济南市PM_{2.5}变化特征及其与气象条件相关性研究尚未见报道,开展相关研究具有十分重要的意义。

1 资料与处理

1.1 资料来源

空气质量监测数据为山东省生态环境厅的国控监测站和省控监测站资料,取济南市市中区、历下区、天桥区、槐荫区、历城区、长清区监测站的平均值,包括逐时PM_{2.5}质量浓度实况观测数据和24h滑动平均数据;气象资料为山东省气象局资料室整编的济南市气象观测站同时时间的观测资料,包括风向、风速(平均、最大)、气温、气压、相对湿度、降水量、日照时数、总云量、低云量等。

1.2 资料处理

资料时段为2013年12月1日—2018年2月28日,以逐时PM_{2.5}质量浓度实况观测数据为基础,分别统计得到逐日、逐月、逐季PM_{2.5}质量浓度平均值及最大值。重点分析春、夏、秋、冬四季的浓度变化规律及与气象条件的关系,春、夏、秋、冬气象因子自由度(df)分别为367、367、363、450。应用SPSS软件分别统计四季PM_{2.5}质量浓度平均值及最大值与气象因子的线性模型 $y=a+bx$ 、对数模型 $y=a+b\ln x$ 、逆模型 $y=a+b/x$ 、复合模型 $y=ab^x$ 、幂模型 $y=ax^b$ 、S模型 $y=e^{(a+b/x)}$ 、增长模型 $y=e^{(a+bx)}$ 、指数模型 $y=ae^{bx}$ 的相关性,确定最优相关模型。对于非线性模型先通过变量置换,把非线性回归化为线性回归,再利用线性回归的方法确定参数 a 及 b 的估计值。选用皮尔逊(Pearson)相关系数来进行相关性分析,其适用于定距连续的数据,符合变量情况。

Pearson 相关系数计算公式:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

相关系数是用以反映变量之间相关关系密切

程度的统计指标,也可以看成是一种标准差,它消除了两个变量变化幅度的影响,而只是单纯地反映两个变量每单位变化时的相似程度。其取值分布在 $-1\sim 1$ 之间,绝对值越大则相关性越强, r 为正值呈正相关, r 为负值呈负相关。

2 济南 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征

2.1 $PM_{2.5}$ 质量浓度年变化特征

根据连续 51 个月 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化趋势(图 1)可以看出,济南市 $PM_{2.5}$ 质量浓度值较高时段出现在 11 月一次年 2 月,明显高于其他月份,这与康桂红等^[20]研究结论一致,该时段正是北方供暖时

期,污染源增多,排放量加大,使污染明显加重^[21-22]。加上该时段气温较低、风速较小且大气层结稳定,也容易造成 $PM_{2.5}$ 的污染加重^[23]。同时,发现 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现显著的逐年递减趋势。

2.2 $PM_{2.5}$ 质量浓度月变化特征

通过济南市月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度和日最大月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(图 2)分析发现,月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度 1 月最大,12 月次之,而 8 月为全年最低,1 月比 8 月高出 1.15 倍;日最大月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度 12 月最大,1 月次之,而 8 月为全年最低,12 月和 1 月均比 8 月高出 1.21 倍以上。

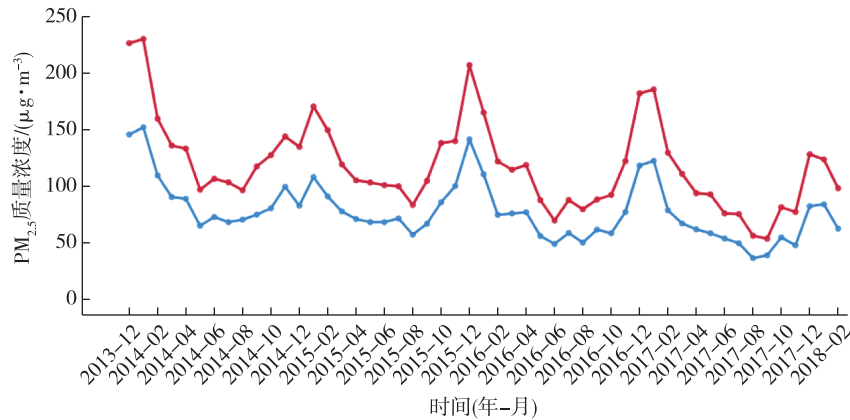


图 1 济南市月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(蓝色线)和日最大月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(红色线)

Fig.1 Monthly mean (blue line) and daily maximum monthly mean (red line) $PM_{2.5}$ mass concentration in Jinan

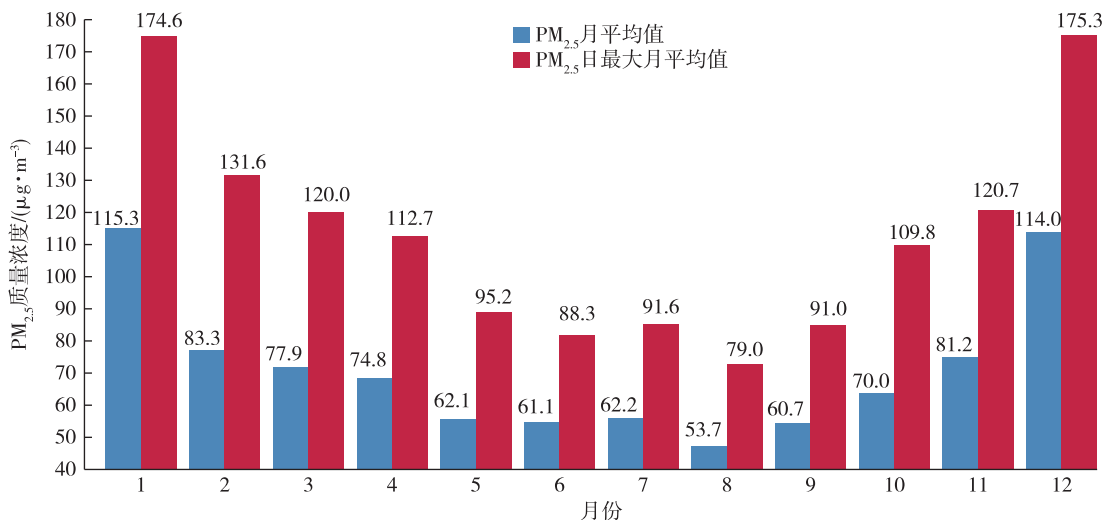


图 2 济南市月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(蓝色柱状)和日最大月均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(红色柱状)

Fig.2 Monthly mean (blue column) and daily maximum monthly mean (red column) $PM_{2.5}$ mass concentration in Jinan

2.3 $PM_{2.5}$ 质量浓度季度变化分析

由济南市季平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度和日最大季平

均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(图 3)看出,无论季平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度还是日最大季平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度,都呈现

出冬季 PM_{2.5} 质量浓度最高, 春季次之, 秋季第三, 夏季最低, 与杨卫芬等^[24] 研究结论相一致。同时, 也发现 PM_{2.5} 质量浓度随季节差异较大。

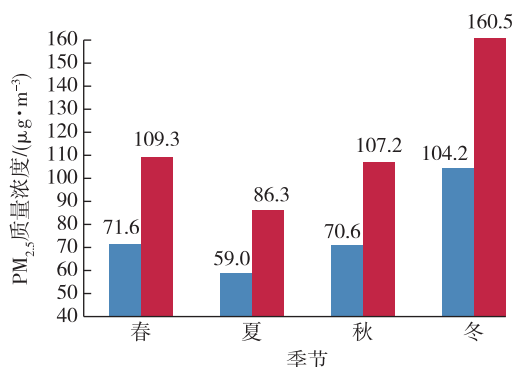


图 3 济南市季平均 PM_{2.5} 质量浓度 (蓝色柱状) 和日最大季平均 PM_{2.5} 质量浓度 (红色柱状)

Fig.3 Quarterly mean (blue column) and daily maximum quarterly mean (red column) PM_{2.5} mass concentration in Jinan

3 PM_{2.5} 质量浓度与气象条件的关系

3.1 PM_{2.5} 质量浓度与风速的关系

分别统计分析四季 PM_{2.5} 质量浓度与风速的相关性 (表 1)。可以看出, 无论春夏秋冬日平均风速、日最大风速还是日瞬时极大风速都与日均 PM_{2.5} 质量浓度、日最大 PM_{2.5} 质量浓度呈反比例关系, 表明随着风速增大 PM_{2.5} 质量浓度将显著减小, 这与周丽等^[25] 研究结论大气污染物浓度与风速呈现反比例关系一致。

表 1 四季 PM_{2.5} 质量浓度与风速的相关性

Table 1 Correlation between PM_{2.5} mass concentration and wind speed in the 4 seasons

| 要素 | 日平均 PM _{2.5} 质量浓度 (Y) | | | 日最大 PM _{2.5} 质量浓度 (Y) | | |
|---------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|-----|---|
| | 相关系数 | 线型 | 相关模型 | 相关系数 | 线型 | 相关模型 |
| 冬季日平均风速 (X) | -0.301*** | 对数 | $Y=140.54-48.521 \times \ln X$ | -0.207*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.669+0.506/X)$ |
| 冬季日最大风速 (X) | -0.412*** | 逆型 | $Y=25.49+337.391/X$ | -0.280*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.459+2.009/X)$ |
| 冬季日瞬时极大风速 (X) | -0.443*** | 逆型 | $Y=267.11+575.805/X$ | -0.315*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.445+3.59/X)$ |
| 春季日平均风速 (X) | -0.247*** | 对数 | $Y=87.663-16.94 \times \ln X$ | -0.199*** | 幂型 | $Y=120.196 \times X^{-0.18}$ |
| 春季日最大风速 (X) | -0.292*** | 逆型 | $Y=44.72+142.672/X$ | -0.193*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.383+1.247/X)$ |
| 春季日瞬时极大风速 (X) | -0.356*** | 逆型 | $Y=39.415+302.348/X$ | -0.235*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.337+2.636/X)$ |
| 夏季日平均风速 (X) | -0.169** | 线性 | $Y=68.577-4.416 \times X$ | -0.201*** | 指数 | $Y=97.071 \times \text{EXP}(-0.089 \times X)$ |
| 夏季日最大风速 (X) | -0.187*** | 对数 | $Y=80.191-13.54 \times \ln X$ | -0.161** | 对数 | $Y=113.417-17.309 \times \ln X$ |
| 夏季日瞬时极大风速 (X) | -0.271*** | 逆型 | $Y=39.941+151.663/X$ | -0.234*** | 逆型 | $Y=61.835+194.887/X$ |
| 秋季日平均风速 (X) | -0.320*** | 逆型 | $Y=49.72+35.976/X$ | -0.220*** | 幂型 | $Y=110.902 \times X^{-0.262}$ |
| 秋季日最大风速 (X) | -0.364*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(3.517+2.497/X)$ | -0.257*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.137+1.688/X)$ |
| 秋季日瞬时极大风速 (X) | -0.429*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(3.454+4.838/X)$ | -0.338*** | S 型 | $Y=\text{EXP}(4.043+3.649/X)$ |

注: ***, **, * 分别表示通过 $p \leq 0.001$, $p \leq 0.005$, $p \leq 0.01$ 显著性检验, 下同。

一方面, 风速较大可加快将区域污染物输送到下风方向, 另一方面, 风速较大会加大对区域污染物的扰动, 加速扩散, 进而降低区域污染等级。风速越小越不利于大气污染物的扩散, 尤其是静风条件下非常不利于大气污染物的扩散, 从而使得大量的悬浮颗粒富集在市区内, 使近地面层的污染物成倍增加, 从而造成严重的空气污染。

3.2 冬季 PM_{2.5} 质量浓度与风向的关系

冬季 PM_{2.5} 质量浓度最大值分别比春季、夏季和秋季高 89.4%、180.8% 和 78.6%, 表明冬季污染严重程度远远大于其他季节。鉴于冬季风速与浓度相关性最为显著, 以 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为间隔梯度, 按照 16 个风向 (气象专业风向方位标准和简写) 绘制济南市冬季最大 PM_{2.5} 质量浓度和平均 PM_{2.5} 质量浓度风向玫瑰图 (图 4), 可以看出, 在不同风向上 PM_{2.5} 质量浓度存在明显差异, 浓度最大值出现在 N 风向上, 其次出现在 ESE 风向上。绘制该时段冬季风向玫瑰图 (图 5), 显示冬季盛行风向为 ESE, 其次为 SE, 显然在盛行主导风向上也出现了浓度较大值。一方面可能与污染物的异地输送有关, 另一方面可能与济南的地形影响有关。进一步对济南城地形因素进行分析, 济南城区在 ESE—SE—S—SSW—SW 一带被泰山山脉包围, 当出现 ESE 风向时, 城市和污染源均在背风侧, 污染物会被下沉气流带至地面, 或在回流区内积累, 难以扩散, 很容易造成高浓度污染; 当出现 N 风向时, 城市和污染源

在山脉迎风侧,受山体阻挡,迎风坡抬升过程会造成堆积污染,甚至在山脚处形成反向旋涡,导致重复污染^[26-27]。特别是在风速小或静风条件下,更加不利于污染物扩散,会加重污染物的积累和维持。另外,冬季较容易出现逆温现象,山脉地形也会导致或加重逆温,从而使大气层结稳定,污染程度加重^[28-29]。

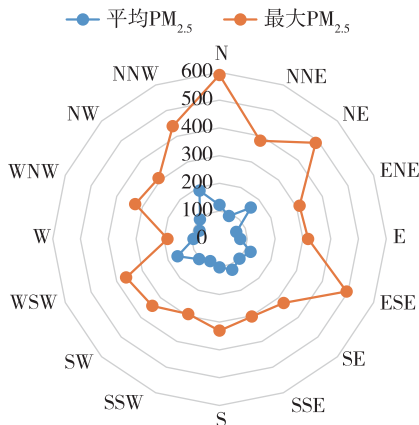


图4 济南市冬季日平均PM_{2.5}质量浓度(蓝色,单位:μg·m⁻³)和日最大PM_{2.5}质量浓度(橙色,单位:μg·m⁻³)风向玫瑰图

Fig.4 Wind direction rose of daily mean (blue) and daily maximum (orange) PM_{2.5} mass concentration in Jinan in winter (units:μg·m⁻³)

析看出,冬季、春季和秋季PM_{2.5}质量浓度与相对湿度呈正相关,进一步证明PM_{2.5}的浓度随相对湿度增大而升高^[30],PM_{2.5}颗粒物在高湿环境下极易凝聚水分形成气溶胶或者发生化学反应生成更加稳定的污染物,因此高湿环境使PM_{2.5}污染有加重趋势。

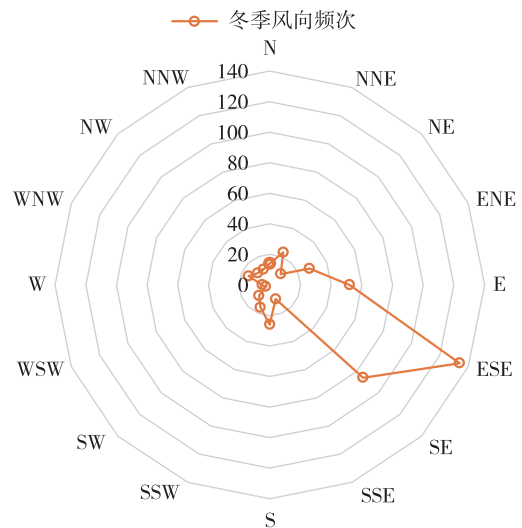


图5 济南市冬季(2013年12月—2018年2月)风向频次玫瑰图

Fig.5 Wind direction frequency rose in Jinan in winter (from December to next February) from December 2013 to February 2018

3.3 PM_{2.5}质量浓度与相对湿度的关系

由PM_{2.5}质量浓度与相对湿度相关性(表2)分

表2 PM_{2.5}质量浓度与相对湿度的相关性

Table 2 Correlation between PM_{2.5} mass concentration and relative humidity

| 要素 | 日平均PM _{2.5} 质量浓度(Y) | | 日最大PM _{2.5} 质量浓度(Y) | |
|------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|--|
| | 相关系数 | 相关模型 | 相关系数 | 相关模型 |
| 冬季日相对湿度(H) | 0.572*** | $Y=2.435 \times H^{0.939}$ | 0.546*** | $Y=5.963 \times H^{0.852}$ |
| 冬季日最小相对湿度(H _{min}) | 0.551*** | $Y=-139.476+74.311 \times \ln H_{\min}$ | 0.504*** | $Y=-52.479+95.458 \times \ln H_{\min}$ |
| 春季日相对湿度(H) | 0.322*** | $Y=-24.172+25.575 \times \ln H$ | 0.297*** | $Y=-24.2+35.661 \times \ln H$ |
| 春季日最小相对湿度(H _{min}) | 0.325*** | $Y=8.157+20.137 \times \ln H_{\min}$ | 0.274*** | $Y=28.579+25.632 \times \ln H_{\min}$ |
| 秋季日相对湿度(H) | 0.307*** | $Y=\text{EXP}(4.556-24.744/H)$ | 0.237*** | $Y=\text{EXP}(4.866-18.237/H)$ |
| 秋季日最小相对湿度(H _{min}) | 0.310*** | $Y=\text{EXP}(4.433-10.714/H_{\min})$ | 0.214*** | $Y=\text{EXP}(4.752-7.099/H_{\min})$ |

3.4 PM_{2.5}质量浓度与气温的关系

在冬季(表3),PM_{2.5}质量浓度与日平均气温及其距平,日最高、最低气温均呈正相关。在春季和秋季仅与气温距平值呈正相关,夏季则相关不显著。

3.5 PM_{2.5}质量浓度与日照时数的关系

通过对PM_{2.5}质量浓度与日照时数相关性(表4)分析可知,除夏季外,PM_{2.5}质量浓度与日照时数、

日照时数距平均呈负相关。这与王海畅等^[31]研究结论一致,但是PM_{2.5}质量浓度与日照时数之间可能存在互为因果关系,一方面,日照有助于加速PM_{2.5}的运动速度,促进污染物的扩散,还有可能加速光化学反应及降解作用;另一方面,PM_{2.5}质量浓度增加,也会导致能见度降低,从而减少日照时数。

3.6 PM_{2.5}质量浓度与气压的关系

PM_{2.5}质量浓度与冬季日平均、最高、最低气压均呈负相关(表 5),气压是地面特征与其他气象参数共同作用的结果,与风速、气温、湿度和大气云团

都具有密切的关系,气压的变化特征可以在一定程度上反映了这个地区的综合特征。其他季节相关性不明显。

表 3 PM_{2.5}质量浓度与气温的相关性

Table 3 Correlation between PM_{2.5} mass concentration and temperature

| 要素 | 日平均 PM _{2.5} 质量浓度(Y) | | 日最大 PM _{2.5} 质量浓度(Y) | |
|-----------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|--|
| | 相关系数 | 相关模型 | 相关系数 | 相关模型 |
| 冬季日平均气温(T) | 0.362*** | $Y=77.82 \times \text{EXP}(0.056 \times T)$ | 0.354*** | $Y=124.616 \times \text{EXP}(0.051 \times T)$ |
| 冬季日平均气温距平(T_d) | 0.464*** | $Y=82.937 \times \text{EXP}(0.078 \times T_d)$ | 0.439*** | $Y=132.173 \times \text{EXP}(0.068 \times T_d)$ |
| 冬季日最高气温(T_{\max}) | 0.276*** | $Y=67.105 \times \text{EXP}(0.039 \times T_{\max})$ | 0.266*** | $Y=109.462 \times \text{EXP}(0.035 \times T_{\max})$ |
| 冬季日最低气温(T_{\min}) | 0.410*** | $Y=96.396 \times \text{EXP}(0.064 \times T_{\min})$ | 0.417*** | $Y=96.396 \times \text{EXP}(0.064 \times T_{\min})$ |
| 春季日平均气温距平(T_d) | 0.266*** | $Y=63.642 \times \text{EXP}(0.028 \times T_d)$ | 0.216*** | $Y=98.277 \times \text{EXP}(0.022 \times T_d)$ |
| 秋季日平均气温距平(T_d) | 0.396*** | $Y=60.453 \times \text{EXP}(0.065 \times T_d)$ | 0.348*** | $Y=92.793 \times \text{EXP}(0.055 \times T_d)$ |

表 4 PM_{2.5}质量浓度与日照时数的相关性

Table 4 Correlation between PM_{2.5} mass concentration and sunshine duration

| 要素 | 日平均 PM _{2.5} 质量浓度(Y) | | 日最大 PM _{2.5} 质量浓度(Y) | |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| | 相关系数 | 相关模型 | 相关系数 | 相关模型 |
| 冬季日照时数(S) | -0.523*** | $Y=160.798-10.189 \times S$ | -0.470*** | $Y=231.93-12.849 \times S$ |
| 冬季日照时数距平(S_d) | -0.492*** | $Y=106.467-9.474 \times S_d$ | -0.435*** | $Y=163.389-11.78 \times S_d$ |
| 春季日照时数(S) | -0.284*** | $Y=88.524-2.17 \times S$ | -0.242*** | $Y=122.585 \times \text{EXP}(-0.024 \times S)$ |
| 春季日照时数距平(S_d) | -0.251*** | $Y=72.099-1.887 \times S_d$ | -0.204*** | $Y=101.856 \times \text{EXP}(-0.02 \times S_d)$ |
| 夏季日照时数(S) | — | — | -0.173*** | $Y=95.149-1.439 \times S$ |
| 夏季日照时数距平(S_d) | -0.131 | $Y=58.55-0.748 \times S_d$ | -0.183*** | $Y=85.415-1.554 \times S_d$ |
| 秋季日照时数(S) | -0.276*** | $Y=85.803-2.897 \times S$ | -0.241*** | $Y=126.567-3.696 \times S$ |
| 秋季日照时数距平(S_d) | -0.247*** | $Y=68.418-2.574 \times S_d$ | -0.212*** | $Y=104.428-3.231 \times S_d$ |

表 5 PM_{2.5}质量浓度与气压的相关性

Table 5 Correlation between PM_{2.5} mass concentration and atmospheric pressure

| 要素 | 日平均 PM _{2.5} 质量浓度(Y) | | 日最大 PM _{2.5} 质量浓度(Y) | |
|-----------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--|
| | 相关系数 | 相关模型 | 相关系数 | 相关模型 |
| 冬季日平均气压(p) | -0.291*** | $Y=\text{EXP}(37.913-0.033 \times p)$ | -0.286*** | $Y=\text{EXP}(35.205-0.03 \times p)$ |
| 冬季日最高气压(p_{\max}) | -0.407*** | $Y=\text{EXP}(54.282-0.049 \times p_{\max})$ | -0.387*** | $Y=\text{EXP}(48.498-0.043 \times p_{\max})$ |
| 冬季日最低气压(p_{\min}) | -0.265*** | $Y=\text{EXP}(33.938-0.029 \times p_{\min})$ | -0.296*** | $Y=\text{EXP}(35.179-0.03 \times p_{\min})$ |

3.7 PM_{2.5}质量浓度与降水量的关系

由表 6 可以看出,PM_{2.5}质量浓度与夏季、秋季日降水量呈负相关。按照 24 h 降水量标准,分别统计分析夏季小雨到大暴雨各量级在降雨前后平均 PM_{2.5}质量浓度变化情况,如表 7 所示。可以看出,各量级降水当天平均 PM_{2.5}质量浓度均较前一天呈下降趋势,而且下降幅度随着降水量级增大而增

大,小雨、中雨、大雨、暴雨平均下降幅度依次为 2.3%、10.5%、17.2% 和 35.1% 以上。证明降水对 PM_{2.5}颗粒物或气溶胶有淋溶洗消的作用,能有效降低 PM_{2.5}质量浓度^[32],而且随着雨强增大,淋溶洗消的作用越显著^[33]。同时也发现,除大暴雨外,其他降水对雨后一天的空气净化也起到一定的作用。

表6 $PM_{2.5}$ 质量浓度与降水量的相关性Table 6 Correlation between $PM_{2.5}$ mass concentration and precipitation

| 要素 | 日平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(Y) | | 日最大 $PM_{2.5}$ 质量浓度(Y) | |
|-----------|------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| | 相关系数 | 相关模型 | 相关系数 | 相关模型 |
| 夏季日降水量(R) | -0.210*** | $Y = EXP(4.03 - 0.006 \times R)$ | -0.153** | $Y = EXP(4.404 - 0.004 \times R)$ |
| 秋季日降水量(R) | -0.144* | $Y = EXP(4.133 - 0.02 \times R)$ | -0.147** | $Y = EXP(4.56 - 0.02 \times R)$ |

表7 夏季降水前后 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化情况Table 7 Change of $PM_{2.5}$ mass concentration before and after summer rainfall

| 雨量等级 | 日期 | 浓度/ $(\mu g \cdot m^{-3})$ | 较昨天/% | 较前两天/% |
|------|-----|----------------------------|-------|--------|
| 小雨 | D-1 | 61.1 | - | - |
| | D | 59.7 | -2.3 | |
| | D+1 | 55.0 | -7.9 | -10.0 |
| 中雨 | D-1 | 59.1 | - | - |
| | D | 52.9 | -10.5 | - |
| | D+1 | 50.1 | -5.1 | -15.0 |
| 大雨 | D-1 | 61.4 | - | - |
| | D | 50.9 | -17.2 | - |
| | D+1 | 57.3 | 12.7 | -5.7 |
| 暴雨 | D-1 | 54.5 | - | - |
| | D | 35.2 | -35.4 | - |
| | D+1 | 38.8 | 10.2 | -28.8 |
| 大暴雨 | D-1 | 50.7 | - | - |
| | D | 32.9 | -35.1 | - |
| | D+1 | 66.2 | 101.2 | 30.5 |

注: D 为下雨当天, D-1 为下雨前一天, D+1 为下雨后一天。

表8 $PM_{2.5}$ 质量浓度与云量的相关性Table 8 Correlation between $PM_{2.5}$ mass concentration and cloud cover

| 要素 | 日平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度(Y) | | 日最大 $PM_{2.5}$ 质量浓度(Y) | |
|-------------|------------------------|---|------------------------|--|
| | 相关系数 | 相关模型 | 相关系数 | 相关模型 |
| 冬季日平均总云量(C) | 0.280*** | $Y = 73.458 \times EXP(0.049 \times C)$ | 0.259*** | $Y = 119.494 \times EXP(0.042 \times C)$ |
| 春季日平均总云量(C) | 0.160** | $Y = 66.497 + 1.391 \times C$ | 0.137* | $Y = 101.927 + 1.747 \times C$ |
| 秋季日平均总云量(C) | 0.218*** | $Y = 59.354 + 2.372 \times C$ | 0.193*** | $Y = 92.771 + 3.05 \times C$ |

2) 四季 $PM_{2.5}$ 质量浓度均与风速呈反比例关系,表明风对污染物有扩散和稀释作用。在不同风向上 $PM_{2.5}$ 质量浓度存在显著差异性,在 N 风向和盛行主导风向 ESE 上均出现了浓度较大值,一方面可能与污染物的异地输送有关,另一方面与济南的特殊地形影响有关。济南 SW—S—SE 偏东一带被泰山山脉包围,当城市和污染源均在背风侧时,污染物会被下沉气流带至地面,难以扩散,很容易造成高浓度污染;当城市和污染源在山脉迎风侧,受山体阻挡,迎风坡抬升过程会造成堆积污染,导致

3.8 $PM_{2.5}$ 质量浓度与云量的关系

$PM_{2.5}$ 质量浓度与冬季、春季和秋季日平均总云量呈正相关(表8)。云量多,则日照时间短,光照强度减弱,对污染物光化学降解可能会产生一定的影响,同时和 $PM_{2.5}$ 质量浓度与日照时数呈负相关结论一致。

4 结论

1) $PM_{2.5}$ 质量浓度随季节变化差异性较大,济南市 $PM_{2.5}$ 质量浓度值较高时段出现在 11 月一次年 2 月,与北方供暖时期一致,冬季平均和最大 $PM_{2.5}$ 质量浓度值都是最高,春季和秋季次之,夏季浓度最低,冬季污染严重程度远远大于其他季节。1 月和 12 月 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高,而 8 月处于全年最低水平。 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈显著的逐年递减趋势,冬季出现重度污染事件也呈逐年减少趋势。

重复污染;冬季较容易出现逆温现象,山脉地形影响也会加重逆温,从而使污染程度加重。

3) 冬季、春季和秋季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与相对湿度和平均总云量呈正相关,与日照时数、日照时数距平呈负相关;冬季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与平均气温及其距平、最高、最低气温均呈正相关,与平均、最高、最低气压均呈负相关;春季和秋季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与气温距平值呈正相关;夏季和秋季, $PM_{2.5}$ 质量浓度与日降水量呈负相关,降水对 $PM_{2.5}$ 有显著的淋溶洗消作用,雨强越大,洗消作用越显著。上述相

关显著性水平均通过 $P \leq 0.01$ 显著性检验。

4) 关于 PM_{2.5} 质量浓度与日照时数、云量和气压呈显著相关性的物理机制, 尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 世界环境污染最著名的“八大公害”和“十大事件”[J]. 管理与财富, 2007(1): 14-15.
- [2] KENNY D A. Seeing through smoke: Sorting through the science and politics in the making of the 1956 British Clean Air Act (Invited) [D]. Baltimore County, Maryland: University of Maryland, 2010.
- [3] FENGER J. Air pollution in the last 50 years: From local to global[J]. Atmos Environ, 2009, 43(1): 13-22.
- [4] BELL M L, DAVIS D L. Reassessment of the lethal London fog of 1952: Novel indicators of acute and chronic consequences of acute exposure to air pollution [J]. Environ Health Perspect, 2001, 109(s3): 389-394.
- [5] 朱增银, 李冰, 赵秋月, 等. 对国内外 PM_{2.5} 研究及控制对策的回顾与展望[J]. 环境科技, 2013, 26(1): 70-74.
- [6] 徐政, 李卫军, 于阳春, 等. 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测[J]. 中国环境科学, 2011, 31(4): 546-552.
- [7] KIM Y J, KIM K W, KIM S D, et al. Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon[J]. Atmos Environ, 2006, 40(s): 593-605.
- [8] 张琳, 高雷娜, 朱保美. 德州能见度与 PM_{2.5}、PM₁₀ 和相对湿度的关系[J]. 山东气象, 2016, 36(2): 26-30.
- [9] 赵璨, 廖纪萍, 王广发. 颗粒物质的基本特性及我国细颗粒物污染现状[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2014, 6(2): 26-28.
- [10] XIANG T, HAN B, SU W, et al. Research progress on PM_{2.5} pollution in China[J]. Meteor Environ Res, 2014, 6(8): 20-22.
- [11] 任泉仲, 徐立宁, 徐明, 等. 大气细颗粒物导致呼吸系统疾病及相关生物机制的研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2018, 48(10): 1260-1268.
- [12] 吴国平, 胡伟, 滕恩江, 等. 我国四城市空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染水平[J]. 中国环境科学, 1999, 19(2): 133-137.
- [13] DOCKERY D W, POPE C A, XU X, et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities[J]. N Engl J Med, 1993, 329(24): 1753-1759.
- [14] 胡敏. 环境保护部正式发布《2015 中国环境状况公报》[J]. 炼油技术与工程, 2016(7): 38.
- [15] 王静, 邱黎, 刘焕彬, 等. 山东重点城市空气质量及其与气象要素的关系[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 644-649.
- [16] 许海超, 李子君, 姜爱霞, 等. 山东省空气质量指数的时空分布特征[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 168-175.
- [17] 周学华, 王哲, 郝明途, 等. 济南市春季大气颗粒物污染研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(4): 755-763.
- [18] 杜改芳, 马民涛, 梁增强. 济南市大气污染时空特征研究[J]. 四川环境, 2014, 33(2): 58-64.
- [19] 李芳, 董倩, 任兆鹏, 等. 鲁西南一次持续空气污染过程的气象条件分析[J]. 山东气象, 2016, 36(3): 36-41.
- [20] 康桂红, 孙兴池, 韩永清, 等. 山东省大气污染时空分布特征分析[J]. 山东气象, 2016, 36(1): 13-17.
- [21] 郝宏飞, 杨婷, 王自发, 等. 2013—2015 年北京污染频发期细颗粒物重污染成因与天气形势关系的研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2201-2213.
- [22] 韩艳, 李东璞, 李思杰, 等. 河南省供暖期大气污染特征及预测分析: 以郑州市为例[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 639-649.
- [23] 杨龙, 贺克斌, 张强, 等. 北京秋冬季近地层 PM_{2.5} 质量浓度垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 2005(2): 23-28.
- [24] 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 霾天气下南京 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及来源分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(1): 12-17.
- [25] 周丽, 徐祥德, 丁国安, 等. 北京地区气溶胶 PM_{2.5} 粒子浓度的相关因子及其估测模型[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 761-767.
- [26] 黄善斌. 关于 PM_{2.5} 与气象条件关系及其预报研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017.
- [27] 李青春, 李炬, 曹晓彦. 地形局地环流对北京冬季大气重污染形成的影响分析[C]// 中国环境科学学会. 中国环境科学学会科学与技术年会论文集: 2017 年第 1 卷. 厦门, 2017: 1069-1077.
- [28] 李培荣, 向卫国. 四川盆地逆温层特征对空气污染的影响[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 32(2): 220-226.
- [29] 王幸, 曾燕, 邱新法. 基于复杂地形下月平均气温分布式模拟的山区逆温研究[J]. 科学技术与工程, 2015(24): 1-7, 28.
- [30] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 34-41.
- [31] 王海畅, 吴泽邦, 周景博, 等. 北京上甸子站 PM_{2.5} 浓度与气象要素关系分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 99-104.
- [32] 周彬, 刘端阳, 魏建苏, 等. 降水对气溶胶颗粒物清除作用的初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(增刊): 160-170.
- [33] 吴进, 孙兆彬, 翟亮, 等. 北京地区不同类型降水对气溶胶粒子的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 812-821.