

2013—2018年北京市PM_{2.5}污染波动特征研究

张章¹, 孙峰^{1*}, 李倩¹, 姚欢¹, 董欣¹, 刘保献^{1,2}, 安欣欣¹, 李云婷¹

(1. 北京市生态环境监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要:利用2013—2018年北京市大气污染物监测数据及气象条件等资料,分析了北京市PM_{2.5}污染波动变化趋势及其影响因素。结果表明,2013—2018年北京市空气质量呈现整体改善趋势,优良天数由2013年的176 d增加至2018年的227 d;重污染天数显著减少,由2013年的58 d逐年递减至2018年的14 d。受污染源排放、特殊气候现象、气象条件等多因素影响,近6年北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值呈现波动下降趋势,其中秋、冬季波动性更加突显。2014—2016年北京市秋冬季PM_{2.5}污染突出,其中2014年10月、2015年11—12月、2016年12月 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值均达到中度污染级别;而2017—2018年北京市秋、冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值均处于优良水平。相关性分析结果显示,地面相对湿度、中层温度与大气污染物呈现较强的正相关性,中层北风频率、地面风速则呈现负相关性。基于上述气象条件及CO、SO₂和NO₂等气态污染物共同构建的拟合方程对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 估算结果较好,多站点的拟合值与实际值的相关系数为0.900~0.947,进一步说明气象条件及相关污染源排放对PM_{2.5}污染具有显著影响。

关键词:细颗粒物;气象条件;相关性分析;多元线性回归模型;北京

中图分类号:X51

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2021)04-0033-07

Analysis of Characteristics of PM_{2.5} Fluctuation in Beijing From 2013 to 2018

ZHANG Zhang¹, SUN Feng^{1*}, LI Qian¹, YAO Huan¹, DONG Xin¹, LIU Bao-xian^{1,2}, AN Xin-xin¹, LI Yun-ting¹

(1. Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This study investigated the variation trend of air quality in Beijing and its causes by using the data of air pollutants and meteorological conditions from 2013 to 2018. The results showed that the air quality of Beijing improved obviously in the past six years, there were 227 days reached primary and secondary standards in 2018 compared with 176 days in 2013. Heavy polluted days decreased year by year, from 58 days in 2013 to 14 days in 2018. Due to the influence of pollution source emissions, climate phenomenon and meteorological conditions, the average PM_{2.5} concentration in Beijing has shown a trend of decrease with fluctuation in the past six years, which is more significantly in autumn and winter. The PM_{2.5} pollution was significant in the fall and winter of 2014—2016, the average concentration of PM_{2.5} reached the level of middle pollution in October 2014, November—December 2015 and December 2016. However, the average monthly concentration of PM_{2.5} did not reached the polluted level in autumn and winter of 2017—2018. In addition, the results of correlation analysis showed that the surface relative humidity and intermediate temperature have a strong positive correlation with air pollutants, while the north wind frequency and surface wind speed have a negative correlation. Based on the meteorological conditions and gaseous pollutants such as CO, SO₂ and NO₂, the PM_{2.5} concentration was well reproduced by the multiple fitting model. Correlation coefficients between the calculated values and observed values were ranging from 0.900 to 0.947, which further confirmed that meteorological conditions and pollution source emission have a significant influence on PM_{2.5} pollution.

收稿日期:2021-05-04;修订日期:2021-06-08

基金项目:大气重污染成因与治理攻关基金资助项目(DQGG0303-01);首都蓝天行动培育科技计划基金资助项目(Z181100005418003,Z191100009119004)

作者简介:张章(1991—),女,高级工程师,博士,从事大气环境研究及空气质量预报预警工作。

*通讯作者:孙峰 E-mail: 768994475@qq.com

Key words: PM_{2.5}; Meteorological conditions; Correlation analysis; Multivariate regression model; Beijing

近年来,北京市空气质量改善较为明显,二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、可吸入颗粒物(PM₁₀)等主要污染物年均浓度呈现大幅降低趋势,然而细颗粒物(PM_{2.5})年均浓度仍超过国家标准,大气污染问题依旧不容忽视^[1-7]。特别是北京市作为 2022 年第 24 届冬季奥林匹克运动会的主办城市,在奥运场馆快速建设与基础设施日益完善的同时,空气质量的保障工作也尤为重要。

目前,针对北京市 PM_{2.5} 污染现象的研究主要集中于时空分布特征、组分及来源解析、区域传输评估、重污染过程解析等方面^[8-14]。齐梦溪等^[15]研究发现,2014—2016 年北京市 PM_{2.5} 污染情况逐年好转。非采暖期主要污染源为机动车尾气排放,而采暖期受燃煤、燃气取暖及机动车尾气排放等人为因素的共同影响。林安国等^[16]研究发现,2012 年 8 月—2013 年 7 月,北京市冬季 PM_{2.5} 质量浓度最高,工业区质量浓度较高但与城区差距不明显。徐冉等^[17]对 2016—2017 年秋、冬季北京市重污染时段的污染特征、气象条件和气团传输路径进行分析,结果表明,冬季重污染程度及持续时间均高于秋季,弱气压场、高湿度、低风速、强逆温和混合层高度低等是研究时段内的主要气象特征。王传达等^[18]研究结果表明,冬季重污染期间硫酸化率(SOR)和氮氧化率(NOR)显著升高,受大气氧化性和排放源共同影响,北京市 SOR 高于石家庄市,而 NOR 相对更低。杨孝文等^[19]对 2013 年 1 月 9—15 日发生的一次重污染过程的污染特征及形成原因进行研究,发现重污染时段二次无机离子和有机物对 PM_{2.5} 贡献较大。

现以北京市 2013—2018 年大气污染物及气象条件等数据为基础,系统分析 PM_{2.5} 污染波动现象及影响因素,深入研究 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与各影响因子之

间的相关关系,进一步构建基于气象条件和污染源排放水平的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多元线性模型,以期对北京市 PM_{2.5} 污染水平的演变及发展趋势提供参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

空气质量数据来源于北京市生态环境监测中心对外发布结果,收集了北京市 2013 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日逐日空气质量指数、空气质量状况等;常规气象观测数据来源于南郊观象台,主要包括中层温度(T850h)、中层北风频率(N850)、地面相对湿度(RHS)、地面风速(WSS)。

1.2 分析方法

首先对北京市 2013—2018 年空气质量及改善趋势进行统计,深入分析季节性波动特征;在筛选出主要影响因子的基础上,研究气象条件及气态污染物排放水平与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的相关性,并对空气质量的中长期尺度波动进行验证。最后通过多元线性回归分析,构建 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与影响因子的模型,并进行拟合验证。

2 结果与讨论

2.1 2013—2018 年北京市空气质量总体情况

2.1.1 空气质量级别天数分布

2013—2018 年北京市空气质量级别天数统计结果见表 1。由表 1 可见,近 6 年优良天数不断增加、重污染天数不断减少的变化趋势进一步证实空气质量的整体改善,其中 2018 年的达标日共 227 d、重污染日共 14 d,为近 6 年空气质量的最佳水平。2013—2018 年,达标天数基本呈现逐年增加趋势,其中优级天数最多增加了 33 d、良级天数最多增加了 30 d;重污染天数逐年减少,从 2013 年

表 1 2013—2018 年北京市空气质量级别天数

年份	优天数/d 良天数/d		轻度污染 天数/d	中度污染 天数/d	重度污染 天数/d	严重污染 天数/d	达标日		重污染日	
	天数/d	占比/%					天数/d	占比/%		
2013	41	135	84	47	45	13	176	48.2	58	15.9
2014	39	133	85	61	32	15	172	47.1	47	12.9
2015	52	134	71	62	31	15	186	51.0	46	12.6
2016	68	130	78	51	30	9	198	54.1	39	10.7
2017	66	160	78	37	19	4	226	62.1	23	6.3
2018	72	155	81	38	14	0	227	63.1	14	3.9

的 58 d 减少至 2018 年的 14 d。此外,2016 年起严重污染天数显著减少,从最多的 15 d(2014、2015 年)减少至 9 d(2016 年)和 4 d(2017 年),2018 年为近 6 年首次未出现严重污染级别天数年份,重污染天数的减少和污染程度的减弱进一步说明北京市空气质量明显改善。

2.1.2 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值变化特征及级别天数分布

2013—2018 年北京市及京津冀区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值变化特征见图 1。由图 1 可见,北京市和京津冀区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值变化趋势基本一致,整体呈现下降趋势,同时存在明显的波动特征。其中,北京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值的最高值出现于 2013 年 1 月,为 159.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此外,仅 2018 年 1 月、8 月和 9 月的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值为优水平,分别为 34,35 和 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在季节尺度方面,与春、夏季相比,秋、冬季的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值相对更高。近 6 年共 7 个月份的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值达到中度污染及以上级别,分别为 2013 年 1 月、2014 年 2 和 10 月、2015 年 11 和 12 月、2016 年 12 月、2017 年 1 月,均处于秋、冬季节。然而,秋、冬季的 PM_{2.5} 污染程度同样存在波动现象,虽然 2013—2016 年秋冬季均出现了 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值达到中度污染及以上级别的月份,但是近 2 年秋、冬季(2017 年 9 月—2018 年 2 月、2018 年 9—12 月)的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值均处于优良水平。

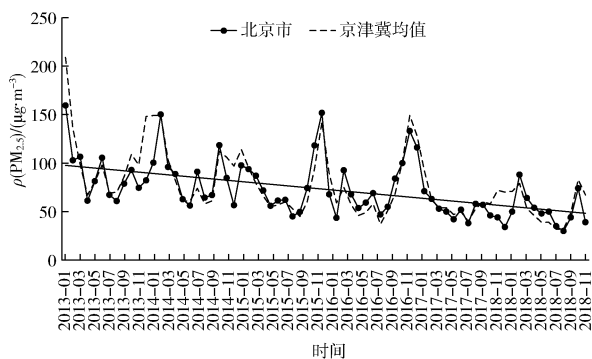


图 1 2013—2018 年北京市及京津冀区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值变化

2013—2018 年北京市 PM_{2.5} 重污染天数的逐月变化见图 2。由图 2 可见,整体变化趋势与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值变化基本一致,呈现为波动性下降特征。与春、夏季相比,秋、冬季更易出现 PM_{2.5} 重污染日,这一特征与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值的统计结果

相一致。2013—2018 年,北京市 PM_{2.5} 重污染天数达到 10 d 及以上的月份均出现于秋、冬季,分别为 2013 年 1 月(13 d)、2014 年 2 月(11 d)和 10 月(10 d)、2015 年 12 月(13 d)、2016 年 12 月(11 d)、2017 年 1 月(10 d)。此外,近 2 年秋、冬季的 PM_{2.5} 重污染天数大幅缩减,其中 2018 年 11 月的 PM_{2.5} 重污染天数最多(4 d),2017 年 9 月和 2018 年 1、9 月均未出现 PM_{2.5} 重污染日,进一步证实了北京市空气质量的波动性特征。

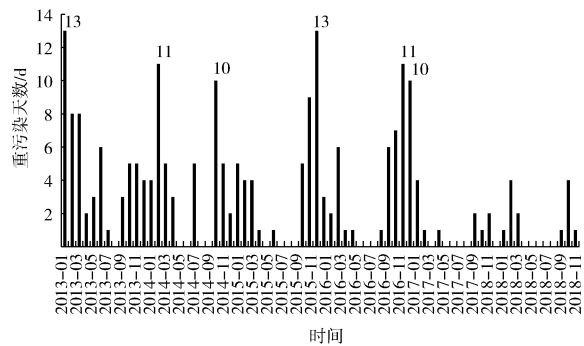


图 2 2013—2018 年北京市 PM_{2.5} 重污染天数逐月统计

2.2 气象条件对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响

2.2.1 气象要素的筛选

根据 2013—2018 年北京市 PM_{2.5} 月均值和重污染天数的分析结果可知,秋、冬季空气质量的波动性相对更加显著,因此在后续研究中以秋、冬季为主要研究时段,深入探究北京市空气质量波动性改善的原因。气象条件是影响污染物生成与扩散的关键因素^[20-22],现针对地面相对湿度、中层温度、中层北风频率、地面南风频率、地面风速等 10 种气象要素距平与气态污染物 SO₂、NO₂、CO、PM_{2.5}、PM₁₀ 共 5 项大气主要污染物月均值距平建立相关性矩阵,结果见表 2。

表 2 气象要素距平与大气主要污染物相关系数矩阵

气象要素	SO ₂	NO ₂	CO	PM _{2.5}	PM ₁₀
地面相对湿度	0.34	0.54	0.82	0.73	0.53
中层温度	0.20	0.60	0.50	0.52	0.58
中层北风频率	-0.32	-0.51	-0.59	-0.66	-0.58
地面南风频率	0.14	0.36	0.32	0.37	0.32
地面风速	-0.27	-0.36	-0.39	-0.33	-0.40
地面气压	-0.03	-0.04	-0.10	0.01	-0.01
降水量	0.02	-0.05	0.10	0.02	-0.07
逆温天数	0.18	0.16	0.16	0.06	0.05
逆温厚度	0.12	0.13	0.32	0.14	0.10
地面温度	-0.07	0.24	0.07	0.18	0.29

根据样本数量,相关系数在 0.3 以上的要素满足 0.99 的置信区间,即认为有较强的相关性(污染物浓度距平已去除长期变化趋势影响)。

2.2.2 气象条件与 $\rho(PM_{2.5})$ 月均值的相关性分析

根据气象要素对 $\rho(PM_{2.5})$ 的敏感性实验结果(表 2),选取 T850h、N850h、RHS 和 WSS 作为气象

条件的分析因子。其中,T850h、N850h 和 WSS 代表颗粒物的扩散程度,地面相对湿度能够在一定程度上反映气溶胶粒子的气粒转化过程。在充分考虑上述气象因素对北京地区 $\rho(PM_{2.5})$ 实际意义的基础上,对各个气象因素与 $\rho(PM_{2.5})$ 进行单因子拟合分析,拟合结果见图 3(a)(b)(c)(d)。

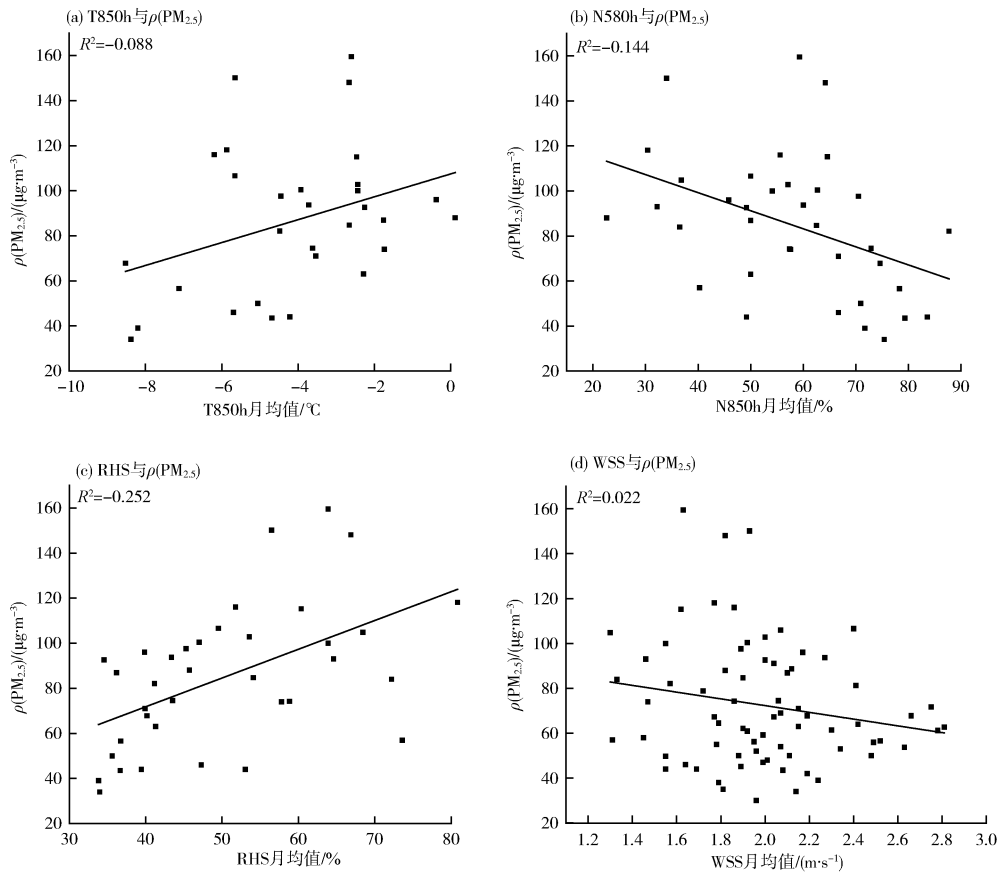


图 3 气象因素与 $PM_{2.5}$ 月均值的散点分布

由图 3(a)可见, $\rho(PM_{2.5})$ 随中层温度的升高而升高,呈现正相关性,这是由于中层温度越高越不利于热力环流的形成,大气扩散形势趋于静稳,不利于 $PM_{2.5}$ 扩散,从而易造成污染积累。由图 3(b)可见, $\rho(PM_{2.5})$ 与中层北风频率呈现明显的负相关性,一方面,中层北风频率高代表冷空气活动频繁,随着上游洁净的偏北风吹向北京,颗粒物扩散速率加快,从而使 $\rho(PM_{2.5})$ 下降;另一方面,中层北风频率低,说明暖势力较强,叠加南部区域污染传输影响,使北京市 $\rho(PM_{2.5})$ 升高。由图 3(c)可见, $\rho(PM_{2.5})$ 与地面相对湿度呈现出较强的正相关关系,其原因可解释为地面相对湿度的增加易促进气粒转化或者非均相的二次生成过程,从而使

$\rho(PM_{2.5})$ 增加。由图 3(d)可见, $\rho(PM_{2.5})$ 与地面风速具有负相关关系,地面风速越大,颗粒物的扩散效果越好, $\rho(PM_{2.5})$ 越低。整体而言,图 3 明显反映出 $\rho(PM_{2.5})$ 与不同气象因子的相关关系,为建立基于气象因素的多元线性模型奠定良好基础。

2.2.3 空气质量极端时期的气象条件分析

厄尔尼诺及拉尼娜等气候异常事件能够对气象条件产生显著影响,对北京及周边地区来说,厄尔尼诺年东亚冬季风的减弱可能造成冬季冷空气频率降低、强度减弱,降水量偏多,而拉尼娜则带来相反的结果,比如冷空气加强,降水偏少等^[23-25]。近 5 年内,全球 2014 年 11 月—2016 年 5 月处于强厄尔尼诺周期,而 2016 年夏季至 2018 年以弱拉尼

娜影响为主^[26-28]。通过对空气质量极端时期进行筛选,探究气候异常事件影响下气象条件对北京市秋、冬季PM_{2.5}污染造成波动的原因。

根据 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值和重污染天数对2013—2018年秋、冬季北京市空气质量极端时期进行筛选,空气质量极端不利时期($\text{PM}_{2.5}$ 月均值 $> 115 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天数 $\geq 9 \text{d}$)有2013年1月,2014年2月和10月,2015年11—12月,2016年12月,2017年1月;空气质量极端有利时期($\text{PM}_{2.5}$ 月均值 $< 68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天数 $\leq 3 \text{d}$)有2014年12月,2016年1—2月,2017年3月,10—12月,2018年1—2月、10月和12月。为了进一步印证气象条件与空气质量的关系,分别统计空气质量极端不利、有利时期的气象条件并与秋、冬季平均水平进行对比分析。

2013—2018年北京市秋、冬季空气质量极端不利时期的气象条件见表3。由表3可见,与近6年秋、冬季平均值相比,极端不利时期的中层温度

及地面相对湿度更高、中层北风频率和地面风速更低,与上述相关性分析结果相一致。以2013年1月为例,与秋、冬季平均值相比,中层温度偏高 $0.76 \text{ }^\circ\text{C}$ 、中层北风频率偏低 7.1% 、地面相对湿度偏高 13.56% 、地面风速偏低 0.24 m/s ,大气扩散条件极为不利, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值及重污染天数均为近6年秋、冬季最差的月份。2013—2018年北京市秋、冬季空气质量极端有利时期的气象条件见表4。由表4可见,受气象条件及污染减排共同作用,空气质量较好的时段基本集中在2017—2018年。与近6年秋、冬季平均值相比,极端有利时期的中层温度及地面相对湿度更低、中层北风频率和地面风速更高,同样与上述相关性分析结果相一致。以2018年1月为例,与秋、冬季平均值相比,中层温度偏低 $3.09 \text{ }^\circ\text{C}$ 、中层北风频率偏高 9.0% 、地面相对湿度偏低 16.34% 、地面风速偏高 0.27 m/s ,大气扩散条件极为有利, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值处于1级优水平且未出现重污染天,为近6年空气质量最佳的月份。

表3 扩散条件极端不利时期的气象要素和空气质量

时间	中层温度/ $^\circ\text{C}$	中层北风频率/ $\%$	地面相对湿度/ $\%$	地面风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho(\text{PM}_{2.5})/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	重污染天数/d
2013年1月	-7.95	59.3	63.88	1.63	159.4	13
2014年2月	-7.95	34.0	56.49	1.93	150.1	11
2014年10月	8.62	36.8	68.43	1.3	118.4	10
2015年11月	-2.54	30.4	80.84	1.77	118.1	9
2015年12月	-5.99	64.2	66.87	1.82	151.8	13
2016年12月	-4.04	64.6	60.36	1.62	133	11
2017年1月	-7.77	55.6	51.77	1.86	116	10
秋、冬季均值 ^①	-8.71	66.4	50.32	1.87		

①中层温度与中层北风频率的秋、冬季均值为近6年1月均值。

表4 扩散条件极端有利时期的气象要素和空气质量

时间	中层温度/ $^\circ\text{C}$	中层北风频率/ $\%$	地面相对湿度/ $\%$	地面风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho(\text{PM}_{2.5})/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	重污染天数/d
2014年12月	-9.34	78.3	36.73	2.52	56.6	2
2016年1月	-11.85	74.6	40.16	2.19	67.8	3
2016年2月	-8.01	79.3	36.67	2.08	43.5	2
2017年3月	-0.71	50	41.32	2.15	63	1
2017年10月	6.12	40.3	73.61	1.31	57	2
2017年11月	-2.27	66.7	47.28	1.64	46	1
2017年12月	-7.64	83.6	39.44	1.69	44	2
2018年1月	-11.80	75.4	33.98	2.14	34	0
2018年2月	-8.48	70.9	35.61	2.11	50	1
2018年10月	4.99	49.2	53.05	1.55	44	1
2018年12月	-9.85	71.7	33.82	2.24	39	1
秋、冬季均值 ^①	-8.71	66.4	50.32	1.87		

①中层温度与中层北风频率的秋、冬季均值为近6年1月均值。

2.3 基于多因素的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 线性模型构建

多元线性回归作为研究一个因变量与多个自变量间线性关系的传统拟合模型,能够较好地应用于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 线性模型构建。根据上述研究结果,在综合考虑气象条件及污染源排放的基础上,建立 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多元线性模型。

2.3.1 气态污染物与 PM_{2.5} 的相关性分析

由于气态污染物的浓度与污染源排放强度及管控措施力度具有强烈的关联性,同时也是 PM_{2.5} 最重要的前体物,因此其对 PM_{2.5} 的影响不容忽视。气态污染物的来源较为单一,其中二氧化硫(SO₂)主要来自燃煤,一氧化碳(CO)和氮氧化物(NO_x)主要来自机动车尾气排放,因此也在一定程度上反映出各类污染源对北京市 PM_{2.5} 的贡献;此外,气态污染物与气象要素的相关系数(表 2)也反映出不同气态污染物具备的独特污染特征,其中 $\rho(\text{CO})$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 的变化主要体现出北京市局地性污染特征, $\rho(\text{SO}_2)$ 的变化具有区域性的污染特征。通过对 2013—2018 年气态污染物 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值进行相关性分析(图 4),结果表明,上述气态污染物均与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 具有良好的线性关系,且全部表现为正相关关系,因此进一步反映出污染源排放强度、减排力度与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 之间的相关性。

2.3.2 基于气象条件及气态污染物的多元线性模型构建

由于 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 受气象条件、污染源排放等多因素共同影响,为了精准构建 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 线性模型,利用上述选取的气象要素和气态污染物的逐月数据进行多元线性回归分析,所建立的方程如下:

$$\rho(\text{PM}_{2.5}) = 51.569 + 0.926 \times \text{T850h} - 0.734 \times \text{N850h} - 0.184 \times \text{RHS} + 6.784 \times \text{WSS} + 0.136 \times \rho(\text{SO}_2) + 47.28 \times \rho(\text{CO}) + 0.026 \times \rho(\text{NO}_2)$$

利用不同方位的丰台云岗、密云镇、延庆夏都、大兴黄村、门头沟双峪监测站点的气象要素和气态污染物逐月数据对上述方程进行验证,结果显示,各站点 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的拟合值与实际值的相关系数分别为 0.934, 0.915, 0.900, 0.947, 0.923, 表明该方程对 PM_{2.5} 的月均值有较强的拟合能力,所选取的因子在一定程度上能够反映 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的月变化规律,进一步验证了气象因素及污染源排放对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的共同影响。

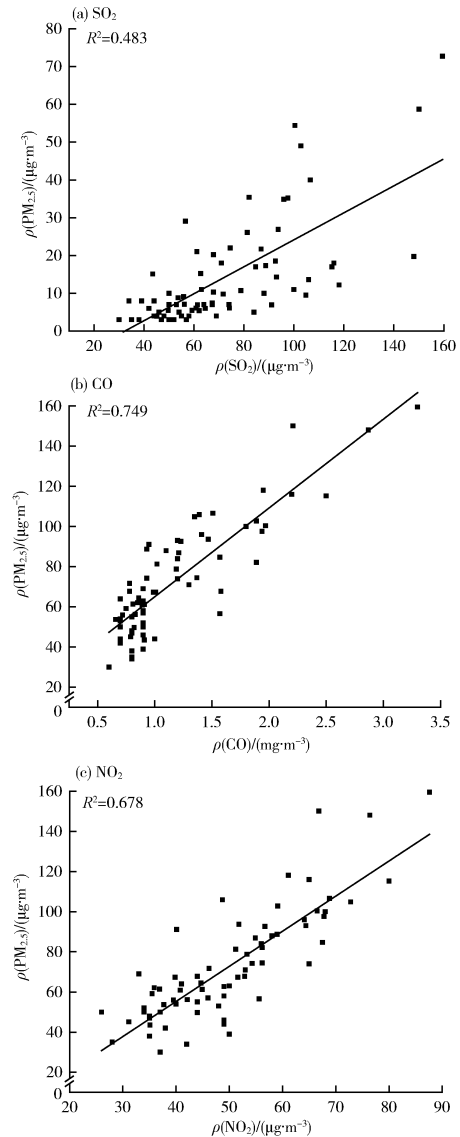


图 4 气态污染物与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值散点图

3 结论

(1) 2013—2018 年北京市空气质量呈现整体改善趋势,与 2013 年相比,优良天数增加了 51 d,重污染天数减少了 44 d。

(2) 受污染源减排、特殊气候现象、气象条件等多因素影响,近 6 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值水平整体下降的同时具备波动性特征,其中秋、冬季波动性更为突显。2013—2016 年秋、冬季均出现了 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值达到中度污染及以上级别的月份,其中 2013 年 1 月和 2015 年 12 月 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值达到重度污染水平,分别为 159.4 和 151.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、重污染天数均为最多的 13 d。而 2017—2018 年秋、冬季的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值均处于优良水平。

(3)相关性分析结果显示,地面相对湿度、中层温度与大气污染物呈现较强的正相关性,中层北风频率、地面风速则与大气污染物呈现负相关性。从空气质量极端时期来看,上述4个气象因素同时趋于有利或不利时,将导致空气质量极好或极差的出现。

(4)基于气象条件及气态污染物共同构建的拟合方程对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 估算结果较好,多站点的拟合值与实际值的相关系数范围在0.900~0.947,进一步验证气象因素及污染源排放对PM_{2.5}污染的共同影响。

[参考文献]

- [1] 安海岗,李佳培,张翠芝,等.京津冀及周边城市PM_{2.5}污染空间关联网络及季节演化研究[J].生态环境学报,2020,29(7):1377-1386.
- [2] 熊新竹,陶双成,高硕晗,等.北京典型主城区冬季大气污染特征分析[J].生态环境学报,2017,26(7):1167-1173.
- [3] 张冲,郎建奎,程水源,等.2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果[J].环境科学,2019,40(8):3397-3404.
- [4] 程念亮,李云婷,邱启鸿,等.2013年北京市PM_{2.5}重污染日时空分布特征研究[J].中国环境监测,2015,31(3):38-42.
- [5] 王占山,李云婷,刘保献,等.北京市PM_{2.5}化学组分特征[J].生态学报,2016,36(8):2382-2392.
- [6] ZHANG L C, AN J, LIU M Y, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of PM_{2.5} concentrations in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2020, 262:114276.
- [7] XU X H, ZHANG T C. Spatial-temporal variability of PM_{2.5} air quality in Beijing, China during 2013—2018 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262:110263.
- [8] 顾芳婷,胡敏,王渝,等.北京2009—2010年冬、春季PM_{2.5}污染特征[J].中国环境科学,2016,36(9):2578-2584.
- [9] 王晓琦,郎建奎,程水源,等.京津冀及周边地区PM_{2.5}传输规律研究[J].中国环境科学,2016,36(11):3211-3217.
- [10] 张忠地,邵天杰,黄小刚,等.2017年京津冀地区PM_{2.5}污染特征及潜在来源分析[J].环境工程,2020,38(2):99-134.
- [11] GAO M, LIU Z L, ZHENG B, et al. China's emission control strategies have suppressed unfavorable influences of climate on wintertime PM_{2.5} concentrations in Beijing since 2002 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20:1497-1505.
- [12] SUN J J, LIANG M J, SHI Z H, et al. Investigating the PM_{2.5} mass concentration growth processes during 2013—2016 in Beijing and Shanghai [J]. Chemosphere, 2019, 221:452-463.
- [13] JIANG L, HE S X, ZHOU H F. Spatio-temporal characteristics and convergence trends of PM_{2.5} pollution: A case study of cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256:120631.
- [14] JI W, WANG Y, ZHUANG D F. Spatial distribution differences in PM_{2.5} concentration between heating and non-heating seasons in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2019, 248:574-583.
- [15] 齐梦溪,赵文慧,孙爽,等.2014—2016年北京市PM_{2.5}污染时空分布特征[J].生态环境学报,2019,28(1):97-105.
- [16] 林安国,梁云平,张战平,等.2012—2013年北京市大气PM_{2.5}污染成分分析[J].生态环境学报,2017,26(7):1174-1179.
- [17] 徐冉,张恒德,杨孝文,等.北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J].环境科学,2019,40(8):3406-3414.
- [18] 王传达,周颖,程水源,等.北京、石家庄2017—2018年PM_{2.5}与SNA组分特征及典型重污染分析[J].环境科学学报,2020,40(4):1340-1350.
- [19] 杨孝文,周颖,程水源,等.北京冬季一次重污染过程的污染特征及成因分析[J].中国环境科学,2016,36(3):679-686.
- [20] 黄俊,王超群,周宝琴,等.广州PM_{2.5}污染特征及与气象因子的关系分析[J].环境污染与防治,2020,42(2):176-186.
- [21] 邓中慈,康平,胡成媛,等.四川盆地PM_{2.5}时空分布及影响因素研究[J].环境污染与防治,2020,42(11):1334-1337.
- [22] 谷阳阳,苏贵金,柴涛,等.北京地区PM_{2.5}浓度影响因素及估算模型[J].环境化学,2018,37(3):397-409.
- [23] 龚道溢,王绍武. ENSO对中国四季降水的影响[J].自然灾害学报,1998,7(4):44-52.
- [24] 刘永强,丁一汇. ENNO事件对我国季节降水和温度的影响[J].大气科学,1995,19(2):200-208.
- [25] 许武成,马劲松,王文.关于 ENSO事件及其对中国气候影响研究的综述[J].气象科学,2005,25(2):212-220.
- [26] 季倩倩,徐峰,张羽.近50 a ENSO时频特征及其与南海台风的相关性[J].广东海洋大学学报,2018,38(2):71-79.
- [27] 李晓惠,徐峰,陈虹颖,等.1980—2016年西太平洋暖池与 ENSO 循环过程的相关分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):85-94.
- [28] 刘颖婧,陈永平,甘敏,等.1951—2016年影响我国热带气旋的强度变化特征及其与 ENSO 的关系[J].应用海洋学报,2018,37(3):301-312.