

基于多元时间序列的哈尔滨市 PM_{2.5} 影响因素分析

甄贞^{1a,b}, 刘佳宇^{1a}, 牛亚洲^{1a}, 冯新悦^{1a}, 魏庆彬^{2,1b}

(1.东北林业大学 a.林学院;b.森林植物生态学教育部重点实验室,哈尔滨 150040;

2.哈尔滨师范大学 地理科学学院,哈尔滨 150025)

摘要:为探究哈尔滨市 PM_{2.5} 与其他空气污染物和气象因子间的动态关系,基于哈尔滨市 2013—2018 年日值空气质量数据和气象观测数据建立 PM_{2.5} 质量浓度的多元时间序列模型.利用相关性较强且平稳的空气污染物(包括 SO₂, NO₂, PM₁₀, CO 和 O₃)和气象因子(平均气温、极大风速、累计降水量、日照时数和平均气压)建立 PM_{2.5} 的向量自回归(Vector Autoregressive, VAR)模型,选择最优模型为 VAR(2),并通过广义脉冲响应和方差分解分析这些因素对 PM_{2.5} 的影响.研究表明:SO₂, NO₂, PM₁₀, CO 对 PM_{2.5} 起促进作用;O₃, 平均气温、极大风速和降水在不同时期对 PM_{2.5} 发挥不同的作用,在短期内平均气温和 O₃ 质量浓度对 PM_{2.5} 起促进作用,这与它们之间的光化学作用有关,极大风速和降水在短期会对 PM_{2.5} 起抑制作用,但随后极大风速会对 PM_{2.5} 起促进作用,这与其会引起地面扬尘有关;长期来看,平均气温和日照时数会对 PM_{2.5} 起促进作用,这些结果与哈尔滨市的季节变化特征有关.在对哈尔滨市 PM_{2.5} 治理时应综合应用多种措施,调整产业结构,发展可替代能源.

关键词:PM_{2.5}; 时间序列; VAR; 广义脉冲响应函数; 方差分解

中图分类号:X823

文献标志码:A

霾是由空气中的烟、灰尘等微粒和硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等粒子组成的气溶胶系统,其核心物质是空气中悬浮的细颗粒,它能使大气浑浊,视野模糊^[1],其中,最为影响人类生存的是空气中空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物 PM_{2.5},又称细颗粒物^[2].PM_{2.5} 表面积较大、活性强,容易富集空气中的大量毒害物质,并且由于 PM_{2.5} 体积较小,能够进入咽喉鼻腔从而进入肺泡参与人体血液循环,引发各种人体疾病^[3-5].它能阻挡、反射太阳光,使生物生长发育受到影响,还会导致能见度下降,给交通带来诸多不便^[6-8].因此防治 PM_{2.5} 有很重要的意义.

PM_{2.5} 的变化可能与其他大气污染物、当地的气象因素以及宏观经济均有关联^[9-11],国内外已有众多学者从 PM_{2.5} 来源、组成、分布特征等角度进行研究.目前研究发现,PM_{2.5} 的主要来源包括机动车尾气、燃煤、二次气溶胶和工业源^[12-14].一些学者从 PM_{2.5} 的空间分布特征角度出发,探究 PM_{2.5} 浓度的时空变异性^[14-16],也有一些学者探讨了气象因子和其他空气污染物对 PM_{2.5} 的影响,发现 PM_{2.5} 浓度与当地气象条件和其他空气污染物浓度密切相关^[17-18].GALLERO 等人^[17]利用多元统计技术进行研究,发现空气质量与气象条件密切相关;TRAN 等^[18]利用气象数据通过计算梯度理查德森数探究它们与 PM_{2.5} 之间的相关性.一些学者从建模预测角度出发,利用大气污染物和气象因子预测 PM_{2.5} 值^[19-20].还有学者利用综合了多元方法和时间序列方法的 VAR 模型对中国部分城市 PM_{2.5} 和其他空气污染物及气象因子间动态关系进行分析,发现其他大气污染物和气象因子在不同时期对 PM_{2.5} 有着不同程度的重要影响^[21-22].上述的 VAR 模型既可用于预测变量间相

收稿日期:2021-03-17; **修回日期:**2021-05-23.

基金项目:东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室开放基金项目(K2020C02);东北林业大学大学生创新训练项目(DC2020019).

作者简介:甄贞(1984—),女,吉林长春人,东北林业大学副教授,博士,研究方向为地理信息科学, E-mail: zhzhen@syr.edu.

通信作者:魏庆彬(1983—),男,黑龙江齐齐哈尔人,哈尔滨师范大学讲师,博士,研究方向为环境生态学、森林微气候学, E-mail: wqb0816@163.com.

互联系的时间序列数据,也可用于分析随机扰动对变量系统的动态冲击从而分析动态影响关系,因此 VAR 模型常用于经济学和自然科学领域,也适合于分析 PM_{2.5} 与其他空气质量和气象观测数据之间的影响关系^[21-22].

近些年,由于地域和气候条件,黑龙江地区 PM_{2.5} 治理之路仍然艰巨.由于冬季寒冷、需要燃煤取暖,一定程度上加剧了省会哈尔滨市空气污染程度^[23].因此,对于哈尔滨市 PM_{2.5} 以及影响因子的研究是很有必要的,目前,国内已有 PM_{2.5} 影响因子的研究多集中于经济发达的京津冀、长三角和珠三角地区,关于黑龙江省的研究并不充分^[24];且文献多是单独研究 PM_{2.5} 与其他空气污染物或单独研究其与气象因素的关系,而使用的方法往往是从时间序列和多元线性回归和相关性分析等静态的角度分析^[8,25-26].这些研究为深刻认识 PM_{2.5} 和解决重污染天气提供了重要依据,但很少有研究同时考虑大气污染物和气象因子并从动态关系的角度探讨哈尔滨市 PM_{2.5} 浓度的主要影响因素,不能较好地适应哈尔滨市当前的环境空气质量及其评价体系的变化.

因此,本研究基于哈尔滨市 2013—2018 年日值空气质量数据(SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, O₃ 质量浓度)和气象观测数据(平均气压、平均气温、平均相对湿度、20 时至次日 20 时累计降水量、平均风速、极大风速、日照时数、平均地表气温)建立向量自回归(Vector Autoregressive, VAR)模型,并运用广义脉冲响应函数分析哈尔滨市 PM_{2.5} 与其影响因素的动态规律,探讨这些因素对 PM_{2.5} 质量浓度的影响,为哈尔滨市 PM_{2.5} 治理提供理论支撑和技术支持.

1 研究区域概况与数据

1.1 研究区域概况

黑龙江省哈尔滨市地处 125°42′~130°10′ E, 44°04′~46°40′ N,南枕长白山脉,北衔小兴安岭,中跨松花江两岸,位于东北亚中心位置,是中国纬度最高、气温最低的省会城市.哈尔滨市四季分明且冬长夏短,冬季平均温度-19℃左右,因此需要利用煤炭进行燃烧取暖.煤炭燃烧所产生的大量空气污染物,使得哈尔滨市冬季雾霾情况严重.

1.2 数据

为研究哈尔滨 PM_{2.5} 与其影响因素之间的动态关系,本研究从黑龙江省环保厅获取了 2013 年 1 月 1 日到 2018 年 12 月 31 日哈尔滨市 6 种标准大气污染物质量浓度指标(包括 SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO 和 O₃)的日值数据;从资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)发布的气象要素站点观测逐日数据集获取了同一时间段 8 种气象因子日值数据,包括平均气压(hPa)、平均气温(℃)、平均相对湿度、20 时至次日 20 时累计降水量(mm)、平均风速(m/s)、极大风速(m/s)、日照时数(h)和平均地表气温(℃)作为气象指标,共 14 项指标,30 674 条记录(2016 年为闰年).对于空气质量数据和气象数据中存在少量缺失值,利用缺失值前后两天数据的平均值作为缺失当天的数据,以保证数据的完整性.

表 1 为 6 种空气质量数据和 8 种气象因子间 Pearson 相关性分析.由表 1 可知,只有相对湿度(RH)与 PM_{2.5} 间的相关性不显著,其余均显著相关,因此剔除相对湿度(RH).PM_{2.5} 与 SO₂, NO₂, PM₁₀, CO 正相关性很强($r > 0.5$).气象因素中压强与 5 种空气污染物(SO₂, NO₂, PM₁₀, CO 和 PM_{2.5})之间有较强的正相关性(与 O₃ 为负相关),风速、地表温度、气温、日照时数与 5 种空气污染物(SO₂, NO₂, PM₁₀, CO 和 PM_{2.5})之间负相关性较强,其中较为显著的是气温和地表温度;而与 O₃ 间有较强的正相关性.由于平均风速(AWS)和极大风速(EWS)相关性较强,为避免多重共线性影响,剔除与 PM_{2.5} 相关性较低的平均风速(AWS).尽管平均气温(TA)和平均地表温度(TE)间也有较强的相关性,但它们均与 PM_{2.5} 有较强且相近的相关性,需经过其他检验再进行取舍.剔除以上变量后本研究所用空气质量数据和气象因子共 12 个变量,描述性统计量如表 2 所示.其中,PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的最大值均超过 500 μg/m³,且均出现于 2013 年 10 月 21 至 22 日,即“2013 年中国东北雾霾事件”,也由此,东北的雾霾天气引起了各界的广泛关注.

表 1 6 种空气质量数据和 8 种气象因子间的 Pearson 相关系数 r Tab. 1 Pearson correlation coefficients r among 6 air quality and 8 meteorological factors

	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}	P	TA	RH	H	AWS	EWS	SH	TE
SO ₂	1.00	0.73	0.59	0.47	-0.43	0.65	0.55	-0.72	0.02 ¹	-0.24	-0.19	-0.32	-0.18	-0.65
NO ₂		1.00	0.78	0.64	-0.32	0.82	0.52	-0.53	-0.04 ¹	-0.30	-0.38	-0.44	-0.06	-0.48
PM ₁₀			1.00	0.59	-0.18	0.93	0.36	-0.39	-0.10	-0.23	-0.13	-0.20	-0.16	-0.37
CO				1.00	-0.23	0.64	0.36	-0.42	0.06	-0.17	-0.23	-0.29	-0.10	-0.37
O ₃					1.00	-0.26	-0.39	0.56	-0.26	0.02 ¹	0.10	0.18	0.39	0.55
PM _{2.5}						1.00	0.46	-0.48	0.00 ¹	-0.21	-0.24	-0.32	-0.22	-0.46
P							1.00	-0.74	-0.16	-0.41	-0.25	-0.39	0.01 ¹	-0.71
TA								1.00	0.10	0.30	-0.01 ¹	0.16	0.23	0.97
RH									1.00	0.44	-0.40	-0.40	-0.49	0.13
H										1.00	0.08	0.19	-0.39	0.26
AWS											1.00	0.88	-0.10	-0.10
EWS												1.00	-0.03 ¹	0.06
SH													1.00	0.31
TE														1.00

注:¹表示不显著,即 $p \geq 0.05$.表 2 本研究所用空气质量与气象因子的描述性统计量($n=2\ 191$)Tab. 2 Descriptive statistics of air quality and meteorological factors used in this study($n=2\ 191$)

变量	最小值	Q_1	中值	平均值	Q_3	最大值	标准差	偏度	峰度
$\rho_{SO_2}/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	3.00	9.00	20.00	35.68	48.50	235.00	38.75	2.10	4.95
$\rho_{NO_2}/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	13.00	32.00	42.00	47.01	58.00	164.00	20.19	1.22	1.96
$\rho_{PM_{10}}/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	13.00	45.00	69.00	92.20	111.00	874.00	75.26	2.88	15.13
$\rho_{CO}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.00	1.00	1.00	1.09	1.00	4.00	0.46	1.84	6.30
$\rho_{O_3}/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	10.00	44.00	61.00	68.59	87.50	229.00	33.60	1.12	1.38
$\rho_{PM_{2.5}}/(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	6.00	23.00	39.00	60.64	76.00	792.00	60.97	3.07	17.63
平均气压 $P/(\text{hPa})$	966.20	989.00	996.80	996.20	1 000.00	1 921.00	9.09	0.10	-0.54
平均气温 $TA/^\circ\text{C}$	-30.00	-10.00	6.50	4.20	18.60	29.70	15.46	-0.31	-0.64
累计降水量 H/mm	0.00	0.00	0.02	1.70	1.08	44.75	4.16	4.12	22.67
极大风速 $EWS/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.00	6.95	8.71	9.03	10.76	22.99	2.90	0.73	0.79
日照时数 SH/h	0.00	3.64	6.61	6.29	9.00	13.30	3.49	-0.18	-0.87
地表温度 $TE/^\circ\text{C}$	-16.83	-3.90	8.14	9.23	22.12	35.56	13.58	0.11	-1.38

注: Q_1 为第一四分位数, Q_3 为第三四分位数.

2 研究方法

2.1 ADF 检验

传统的 VAR 模型要求时间序列为平稳序列或协整的序列,以避免“伪回归”问题^[27-29].如果一个时间序列的均值、方差没有系统的变化,且严格消除了周期性变化,则称该时间序列为平稳的时间序列^[27].

判断方法主要有图检验法和平方根法,本文主要应用平方根法.平方根检验法是通过检验自回归方程的特征根是否都在单元根上及其以内来检验其平稳性.其中最常用的是单位根检验(Augmented Dickey-Fuller test, ADF 检验),零假设(H_0)为:检验序列 Y_t 存在一个单位根,即为非平稳序列.对任意 p 阶的自回归方程

AR(p) 如下所示:

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \cdots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t, t = 1, 2, \dots, T, \quad (1)$$

其中, Y_t 为本文中待检验的各项大气污染指标和气象指标时间序列, t 为变量 Y 的时间延迟值, p 为自回归模型阶数, $\phi_i (i=1, 2, 3, \dots, p)$ 为自回归模型系数, ε_t 为均值为 0、方差为 σ^2 的白噪声序列。(1) 式为无常数均值、无趋势的 p 阶自回归过程, 它的特征方程为(2)式:

$$\lambda^p - \phi_1 \lambda^{p-1} - \cdots - \phi_p = 0, \quad (2)$$

其中, $\lambda_i (i=1, 2, \dots, p)$ 为特征根, 如果方程的所有特征根都在单位圆内, 即 $|\lambda_i| < 1$, 则序列平稳。

本研究还利用 ADF 检验法对另外两种类型的自回归过程进行检验, 为(3)式和(4)式:

$$Y_t = \mu + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \cdots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

$$Y_t = \mu + \beta_t + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \cdots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t, \quad (4)$$

其中, μ 为常数均值, β_t 为线性趋势。(3) 式为有常数(μ)、无趋势的 p 阶自回归过程, (4) 式为既有常数(μ)、又有线性趋势的 p 阶自回归过程。

2.2 向量自回归模型(VAR)

本文采用向量自回归(Vector Autoregressive, 简称 VAR)模型来分析变量指标间的动态作用规律。VAR 模型中假定所有变量都是内生变量, 用内生变量对全部内生变量的滞后期进行回归, 能够很好地反映变量之间的动态关系^[28-29]。VAR 模型不但常用于预测相互联系的时间序列系统, 还可以用于分析随机扰动对变量系统的动态冲击, 较适合本研究中各种气象因子和大气污染物变化对 PM_{2.5} 形成的影响^[21]。VAR(p) 模型公式如下:

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i} + \xi_t, \quad (5)$$

其中, Y_t 是 k 维内生变量列向量, 本文将 PM_{2.5} 和通过单位根检验的污染物变量、气象变量作为模型的内生变量; c 是 VAR 模型的截距向量; p 为滞后阶数; β_i 为 $k \times k$ 维待估计的系数矩阵; ξ_t 为 k 维随机误差列向量, 满足 $\xi_t \sim N(0, \Sigma)$, 为白噪声序列。

2.3 广义脉冲响应函数

由于 VAR 模型是一种非理论性的模型, 因此在分析 VAR 模型时, 往往不能分析一个变量的变化对另一个变量的影响, 而需要分析当一个误差项发生变化, 或者说模型受到某种冲击时对系统的动态影响, 因此需要脉冲响应函数方法(impulse response function, IRF)^[28]。它可以用来描述随机误差的一个自身标准差的信息冲击对其他变量当期值和未来值的影响, 还能够刻画这种影响的方向和持续的时长。但由于传统的正交化脉冲响应函数会因变量的顺序不同产生不同的结果^[21], 因此本文采用广义脉冲响应函数(generalized impulse response function, GIRF)分析各个大气污染物和气象因子的变动对 PM_{2.5} 值的影响。基于(5)式, 选择冲击其中一个变量, 根据过去的误差分布计算其他冲击的影响。 t 时刻的广义脉冲响应函数如(6)式所示:

$$GI_y(n, \phi, \Omega_{t-1}) = \sqrt{\sigma_{ii}} A_n \sum e_i, \quad (6)$$

其中, ϕ 为 k 维冲击向量, $n = 1, 2, \dots$ 表示脉冲响应的期数, 信息集 Ω_{t-1} 表示 $t-1$ 期以前的相关信息的集合, $GI_y(n, \phi, \Omega_{t-1})$ 表示 ϕ 冲击对 Y_{t+n} 期望值导致的影响, 即脉冲响应函数值, $\sqrt{\sigma_{ii}} = \varphi_i$, 而 $\varphi = E(\xi_t | \xi_{it}) = \sqrt{\sigma_{ii}}; e_i$ 是一个 $k \times 1$ 维的选择矩阵, 第 i 个元素为 1, 其他元素为 0。

3 结果与分析

3.1 单位根检验

为保证 VAR 模型的有效性, 首先采用 ADF 单位根检验法对数据的平稳性进行检验, 见(1)、(3)和(4)式, 遵循施瓦兹准则(Schwarz Criterion, SC)选择最优滞后期, 检验的零假设(H_0): 序列非平稳。由表 3 可以得出, 在 5% 显著性水平的情况下, 只有地表温度(TE)无法拒绝零假设, 其余变量无论应用哪种方法均拒绝零假设, 即为平稳序列。同时, 由表 1 可以看出, 平均气温(TA)和地表温度(TE)间相关性过高($r=0.97$), 因此剔除地表温度(TE)。

3.2 模型构建及稳定性检验

VAR 模型的最优滞后期判断结果中,综合考虑模型的有效性和简洁性,根据 SC 选择模型的滞后期为 2,构建向量自回归模型 VAR(2),模型形式如(7)式所示.

$$\begin{aligned}
 PM_{2.5} = & 0.239 \times (-1)_{SO_2} - 0.086 \times (-2)_{SO_2} + 0.250 \times (-1)_{NO_2} - 0.084 \times (-2)_{NO_2} - 0.069 \times \\
 & (-1)_{PM_{10}} + 0.022 \times (-2)_{PM_{10}} - 1.973 \times (-1)_{CO} - 0.926 \times (-2)_{CO} + 0.062 \times (-1)_{O_3} - 0.067 \times \\
 & (-2)_{O_3} + 0.986 \times (-1)_P - 0.068 \times (-2)_P - 0.446 \times (-1)_{TA} + 0.410 \times (-2)_{TA} + 0.289 \times (-1)_H - \\
 & 0.015 \times (-2)_H + 0.395 \times (-1)_{EWS} + 1.211 \times (-2)_{EWS} + 1.060 \times (-1)_{SH} - 0.436 \times \\
 & (-2)_{SH} + 0.745 \times (-1)_{PM_{2.5}} - 0.043 \times (-2)_{PM_{2.5}} - 921.556, \tag{7}
 \end{aligned}$$

其中, $(-i)$ 表示某个因子的滞后 i 阶变量, $i = -1$ 或 -2 . P 为平均气压, TA 为平均气温, H 为降雨量, EWS 为极大风速, SH 为日照时数. 可以看到 $PM_{2.5}$ 主要与 P 的滞后一阶、 TA 的滞后二阶、 EWS 的滞后二阶、 SH 的滞后一阶和自身的滞后一阶呈较强正向关系(系数 > 0.4); 与 CO 的滞后一阶、二阶、 TA 的滞后一阶和 SH 的滞后二阶呈较强的负向关系(系数 < -0.4).

表 3 ADF 检验结果 (p 值结果, $\alpha = 0.05$)

Tab. 3 ADF test results (p -value results, $\alpha = 0.05$)

变量项	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}	P	TA	H	EWS	SH	TE
无常数均值和趋势(1)式	0.028	0.044	0.000	0.042	0.072	0.000	0.698	0.018	0.000	0.189	0.019	0.052
只有常数均值(3)式	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.123	0.000	0.000	0.000	0.184
有趋势项常数均值(4)式	0.149	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.374	0.000	0.000	0.000	0.436

注: P 为平均气压; TA 为平均气温; H 为累积降水量; EWS 为极大风速; SH 为日照时数; TE 为地表温度.

进一步利用(2)式中的 AR 特征根多项式对已建立的 VAR(2) 模型进行模型稳定性检验,如图 1,可以看出 AR 特征多项式的逆根都在单位圆内,因此建立的 VAR(2) 模型系统是稳定的,即长期来看 $PM_{2.5}$ 与相关的大气污染物和气象因子构成的动态模型系统是稳定的.

3.3 广义脉冲响应函数分析

在 VAR(2) 模型的基础上采用广义脉冲响应函数分析 $PM_{2.5}$ 对其他 5 种污染物 (SO_2 , NO_2 , PM_{10} , CO , O_3) 和 5 种气象因子(平均气压、平均气温、降水量、极大风速、日照时数)的脉冲响应,研究它们与 $PM_{2.5}$ 的动态关系,结果如图 2 所示.

由图 2(a-d)可知,当给 SO_2 , NO_2 , PM_{10} 和 CO 一个自身标准差大小的正向冲击时, $PM_{2.5}$ 在第 1 期就达到了最大值,但随着时间变化这种影响会逐渐消退,在第 5 期以后 $PM_{2.5}$ 值趋于平稳. 当给 O_3 一个标准差大小的正向冲击时, $PM_{2.5}$ 值先升高,但随着时间变化 $PM_{2.5}$ 值升高速率变慢,直至负增长,如图 2(e)所示. 由图 2(f, g)可知,当给平均气压 (P) 一个标准差大小的正向冲击时, $PM_{2.5}$ 受到促进作用,但随着时间变化这种影响会逐渐消退; 当给平均气温 (TA) 一个标准差大小的正向冲击时, $PM_{2.5}$ 先受到短暂的促进作用,第 1 期以后,平均气温 (TA) 对 $PM_{2.5}$ 起到抑制作用,但这种抑制作用随时间变化程度较小. 由图 2(h, i)可知,给降水 (H) 和极大风速 (EWS) 一个自身标准差大小的正向冲击时, $PM_{2.5}$ 出现负增长,即它们对 $PM_{2.5}$ 有抑制作用,极大风速 (EWS) 在第一期对 $PM_{2.5}$ 的抑制作用最大,随时间的变化逐渐趋于 0,第 8 期开始起到微弱的促进作用; 降水在第 2 期对 $PM_{2.5}$ 的抑制作用最大,这种作用也随时间的变化逐渐趋于

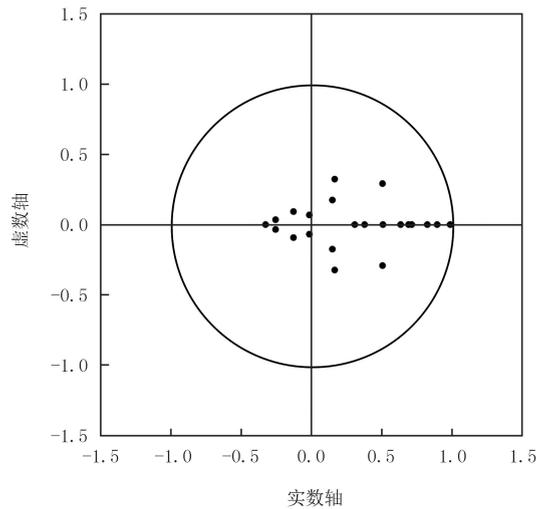


图1 VAR(2)模型AR特征根多项式逆根图

Fig. 1 Inverse root of AR characteristic root polynomial of VAR(2) model

0.由图 2(j)可知,当给日照时数(*SH*)一个标准差大小的正向冲击时,第 1 期时 PM_{2.5} 值先降低,第 2 期开始升高,但随着时间变化 PM_{2.5} 值又变为负增长。

3.4 方差分解分析

为了进一步探究 SO₂, NO₂, PM₁₀, CO, O₃, 平均气压(*P*)、平均气温(*TA*)、降水量(*H*)、极大风速(*EWS*)、日照时数(*SH*)这 10 个指标对 PM_{2.5} 的相对作用的大小和变化情况,基于 VAR(2)模型对 PM_{2.5} 进行方差分解(最大滞后期选为 10 期),结果如表 4。

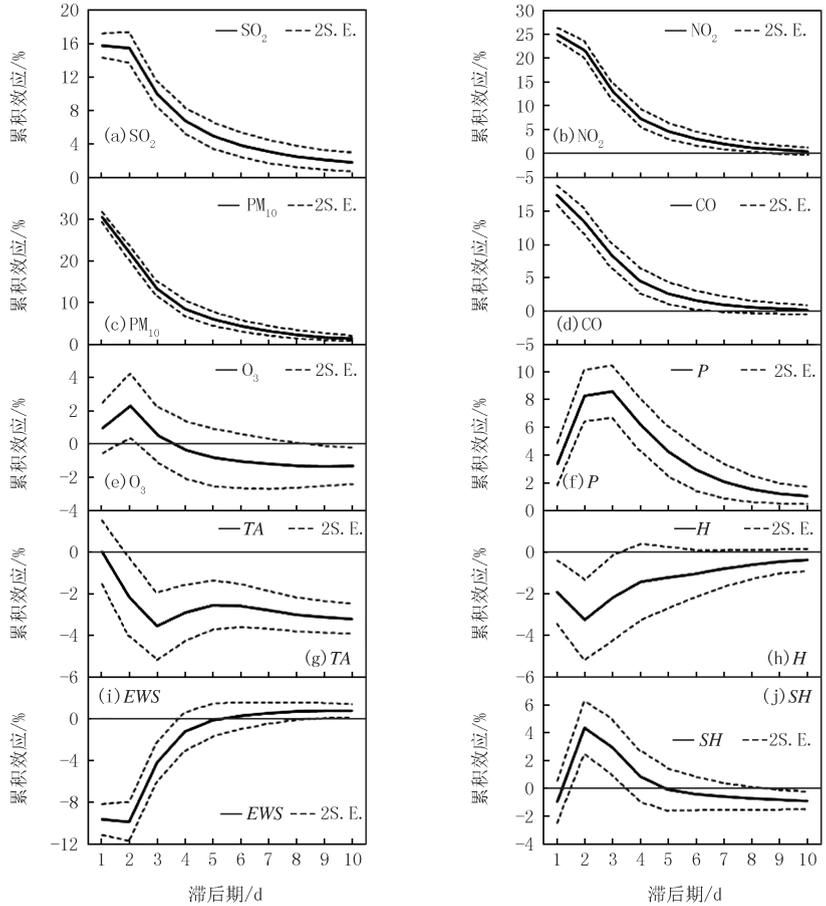
从表 4 可以看出 PM_{2.5} 在第 1 期主要受到 SO₂, NO₂ 和气象因子的影响,空气污染物指标中 NO₂ 的影响最

为显著,气象指标中极大风速(*EWS*)的影响最为显著,方差贡献率分别为 28.646%和6.602%,PM_{2.5} 受到自身的方差贡献率为47.903%。随着时间增加,SO₂, PM₁₀, CO, 平均气压(*P*), 平均气温(*TA*), 降水量(*H*), 日照时数(*SH*)对 PM_{2.5} 的方差贡献率逐步增加,这表明它们对 PM_{2.5} 质量浓度的影响具有一定的滞后性,空气污染物中 SO₂ 有着最明显的稳定的滞后影响,稳定在 20%左右。

表 4 PM_{2.5} 的方差分解结果(滞后期 = 10 d)

Tab. 4 The variance decomposition analysis of PM_{2.5} (Period = 10 d)

滞后期	标准误差	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	CO	O ₃	PM _{2.5}	<i>P</i>	<i>TA</i>	<i>H</i>	<i>EWS</i>	<i>SH</i>
1	2.577	15.164	28.646	0.000	0.000	0.000	47.903	0.878	0.152	0.027	6.602	0.627
2	3.847	18.146	27.706	0.126	0.017	0.048	42.794	3.881	0.152	0.027	6.620	0.483
3	4.662	19.089	27.080	0.221	0.026	0.044	40.928	6.364	0.134	0.030	5.672	0.412
4	5.251	19.768	26.445	0.208	0.051	0.042	39.965	7.482	0.139	0.034	5.388	0.478
5	5.728	20.243	26.004	0.227	0.083	0.042	39.321	7.933	0.173	0.034	5.336	0.604
6	6.144	20.568	25.679	0.262	0.120	0.043	38.866	8.112	0.263	0.045	5.348	0.695
7	6.516	20.777	25.416	0.293	0.155	0.045	38.506	8.171	0.432	0.066	5.382	0.756
8	6.854	20.902	25.187	0.320	0.186	0.046	38.192	8.177	0.675	0.092	5.421	0.802
9	7.165	20.969	24.978	0.345	0.212	0.046	37.903	8.160	0.971	0.120	5.457	0.839
10	7.453	20.998	24.784	0.369	0.232	0.046	37.628	8.136	1.298	0.149	5.490	0.873



实线表示 PM_{2.5} 受到冲击后的走势,虚线为 PM_{2.5} 走势的二倍标准差。

图 2 PM_{2.5} 对 10 个变量的广义脉冲响应函数

Fig. 2 The generalized impulse response function of PM_{2.5} to the other 10 variables

总体而言,空气污染物因子对 PM_{2.5} 的方差贡献率高于气象因子,空气污染物中 SO₂ 和 NO₂ 的影响较

为显著,气象因子中极大风速(EWS)的影响最为显著,这与广义脉冲响应函数的结果相近。

4 讨论与结论

4.1 讨论

由于哈尔滨冬季寒冷且较长,全年有近三分之一的天数为供暖期,因此分析空气质量指数时应综合考虑季节和供暖期的变化。将样本分为供暖期和非供暖期研究,其中每年10月20日左右为开始供暖日期,次年4月15日左右为停暖日期,部分寒冷年份会各提前或推迟5d左右。由于哈尔滨冬季来临较早且持续较长,本文将4、5、6、7、8月统称为春夏季,9、10月为秋季,11月为初冬,12、1、2、3月为深冬,结果如图3所示。由统计可知,2013—2018年严重污染($\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $>250\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)和重度污染($150\ \mu\text{g}/\text{m}^3 < \text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $<250\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)天数分别占样本总数的1.14%和3.65%,2013年出现重度以上污染天气数目最多,2013年出现了多次 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度超过 $500\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的天气,甚至接近 $800\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,尤为突出的是2013年10月20日(图3),即哈尔滨市当年冬季燃煤取暖系统开启的第二天,部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 值超过超出世界卫生组织安全标准40多倍。直至2018年,哈尔滨市供暖带来的雾霾问题仍然严峻,但与2013年相比,2018年的严重污染天数已降低了88%(从57d降为7d)。严重污染天气都发生于供暖期,重度污染发生在供暖期的也高达95%,主要原因包括哈尔滨市冬季“逆温”、“静风”导致污染物难以扩散^[30-31];冬季燃煤取暖和从10月下旬开始的秸秆焚烧^[23]。因此,季节效应是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响因素,本研究也尝试建立了含季节项的VAR模型,但由于加入季节效应的VAR模型和未加入季节效应的VAR模型相比拟合优度提高不明显,且大大增加了模型的复杂度,因此没有应用。由于哈尔滨市地处较高纬度地区,有明显的冬季昼短夜长现象,而模型变量中的日照时数可以看作是 $\text{PM}_{2.5}$ 季节变化的体现,一定程度上弥补了未考虑含季节项模型的缺陷。

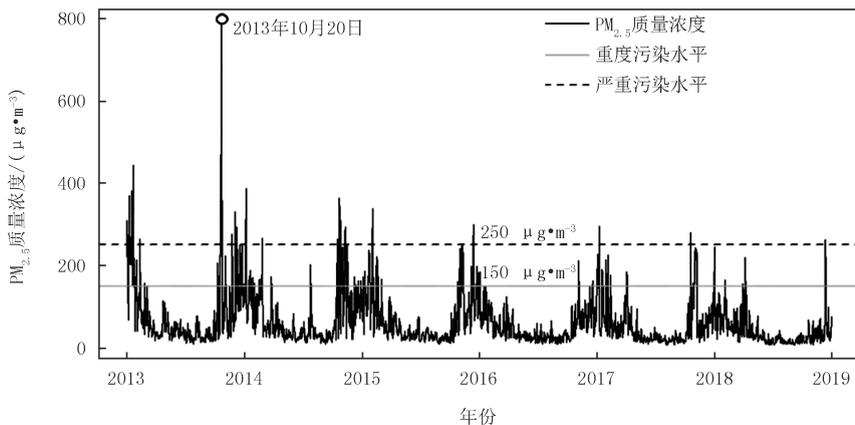


图3 2013—2018年黑龙江省哈尔滨市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化

Fig.3 The trend of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Harbin City, Heilongjiang Province from 2013 to 2018

从相关性检验可以看出:与 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性最强的是 PM_{10} 和 NO_2 ,其次是 SO_2 , CO ,最后是气象因素,说明气象因素相对于其他污染物来说与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性较弱,但这与不同季节的气象条件不同有关。基于通过平稳性检验的变量建立VAR(2)模型,并利用AR特征根多项式逆根图进行模型系统的稳定性检验,空气污染物和气象因子的变化既受到自身影响也受到外界影响,是一个复杂的系统,但它们构成的空气质量模型系统是稳定的。

基于VAR(2)模型的广义脉冲响应函数表明:短期来看, SO_2 , NO_2 , PM_{10} 和 CO 质量浓度的增加会引起 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的增加,而且初期就达到了顶峰,且这种促进作用随着时间变化越来越小,这与国内一些报道^[26,32]的结论一致,因此在治理空气污染时要加大对 SO_2 , NO_2 , CO 和 PM_{10} 的治理力度。在较短时间内平均气温和 O_3 质量浓度的增加会引起 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的增加,这与宋宇等人^[26]的研究结果一致,持续高温引发的光化学反应使 SO_2 转化为 $\text{PM}_{2.5}$ 的速度加快。 O_3 和 NO_2 等气态污染物由于光化学作用产生烟雾,这种现象加剧了空气污染对生态系统的破坏^[33]。但是,平均气温和 O_3 质量浓度的增加在长期又对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度

起到抑制作用,与很多中部与南方城市的研究结果相似^[32,34],由于哈尔滨地域位置的特殊性,每年有长达 161 天处于初冬或深冬季节,春季的空气污染明显较少,这表现为平均气温与日照时数的升高对 PM_{2.5} 起到抑制作用的现象。极大风速和降水在初期对 PM_{2.5} 质量浓度起到较为明显的抑制作用,其中降雨会使污染物沉淀,起到消减污染物的作用,这个结果与张佐^[34]等人的研究结果一致,但极大风速在第 8 期后对 PM_{2.5} 起到促进作用,这是由于后期风速的增大会引起地面扬尘的加大和带来周边地区的空气污染物,这与文献^[32, 34]的研究结果一致;平均气压增加在短期内对 PM_{2.5} 质量浓度的促进作用逐渐增大并达到最大值。方差分解进一步说明了 SO₂, NO₂ 对 PM_{2.5} 质量浓度影响较大。总体来看,各个空气污染物和气象因子并非单独对 PM_{2.5} 产生影响,从污染物来源来看,每年秋冬季的生物质燃烧是农村地区 PM_{2.5} 的首要来源,燃煤和工业排放则是城市市区 PM_{2.5} 的主要来源^[35],主要也反映在 SO₂, NO₂ 和 PM₁₀ 对 PM_{2.5} 质量浓度的影响。此外,气象条件中,冬季的污染表现为非均相反应增强、光化学反应减弱,对天气变化尤其敏感,主要是由高相对湿度、低风速、低边界层高度引起的^[31]。因此,对 PM_{2.5} 的治理和预测可以从污染物源头角度出发,还可以从气象条件出发,将治理手段与统计分析结果及哈尔滨市实际情况相结合。

4.2 结 论

近年来,哈尔滨市的大气污染治理是卓有成效的,但由于冬季供暖、气象因素和生物质燃烧等问题,哈尔滨市的污染天气仍然多发生于冬季。本研究基于 2013—2018 年哈尔滨市空气质量数据和气象因子建立了 VAR(2)模型,并进行脉冲响应函数分析,探究了哈尔滨市 PM_{2.5} 与其他空气污染物和气象因子之间的动态关系。研究可知,虽然 PM_{2.5} 与其他空气污染物和气象因子的变化受到自身和外界影响,是一个复杂的系统,但它们构成的空气质量模型系统是稳定的。CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ 质量浓度的增加会引起 PM_{2.5} 质量浓度的增加;O₃, 平均气温,极大风速,降水的增加在不同时期对 PM_{2.5} 发挥不同的作用,短期内平均气温和 O₃ 质量浓度的增加会引起 PM_{2.5} 质量浓度的增加,这与它们之间的光化学作用有关;极大风速和降水的增加在短期会使 PM_{2.5} 质量浓度的降低,但随后极大风速会对 PM_{2.5} 起到促进作用,这与极大风速的增加会引起地面扬尘有关。长期来看,平均气温和日照时数的增加会引起 PM_{2.5} 质量浓度的增加,这与哈尔滨市的地理位置和气候特征有关。本研究可以对不同时期 PM_{2.5} 浓度的治理提供技术支持和科学依据。

参 考 文 献

- [1] 潘慧峰,王鑫,张书宇.雾霾污染的持续性及空间溢出效应分析:来自京津冀地区的证据[J].中国软科学,2015(12):134-143.
PAN H F, WANG X, ZHANG S Y. Duration and spatial spillover effects of haze pollution: evidence from Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Soft Science, 2015(12): 134-143.
- [2] 环境保护部发布污染物排放新标准[J].中国环境科学,2014,34(6):1456.
The Ministry of Environmental Protection issued new standards for pollutant discharge[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1456.
- [3] 郭丽君,郭学良,方春刚,等.华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析[J].中国科学:地球科学,2015,45(4):427-443.
GUO L J, GUO X L, FANG C G, et al. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2015, 45(4): 427-443.
- [4] BHARADWAJ P, ZIVIN J G, MULLINS J T, et al. Early-life exposure to the Great Smog of 1952 and the development of asthma[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2016, 194(12): 1475-1482.
- [5] 吴海龙,余新晓,师忱,等.PM_{2.5}特征及森林植被对其调控研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(6):116-122.
WU H L, YU X X, SHI C, et al. Advances in the study of PM_{2.5} characteristic and the regulation of forests to PM_{2.5}[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6): 116-122.
- [6] 董雪玲.大气可吸入颗粒物对环境 and 人体健康的危害[J].资源·产业,2004,6(5):52-55.
DONG X L. Impact of inhalable particles in atmosphere on environment and human health[J]. Resources & Industries, 2004, 6(5): 52-55.
- [7] 王志娟,韩力慧,陈旭峰,等.北京典型污染过程 PM_{2.5} 的特性和来源[J].安全与环境学报,2012,12(5):122-126.
WANG Z J, HAN L H, CHEN X F, et al. Characteristics and sources of PM_{2.5} in typical atmospheric pollution episodes in Beijing[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 122-126.
- [8] 王继康,张恒德,桂海林,等.能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征[J].环境科学,2019,40(7):2985-2993.
WANG J K, ZHANG H D, GUI H L, et al. Relationship between atmospheric visibility and PM_{2.5} concentrations and distributions[J]. En-

- vironmental Science, 2019, 40(7): 2985-2993.
- [9] WANG J H, OGAWA S. Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(8): 9089-9101.
- [10] 胡庆龙, 伍亚. 基于社会经济因素的中国 PM_{2.5} 排放的区域差异分解分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(6): 169-185.
HU Q L, WU Y. Decomposition analysis of PM_{2.5} emission differences between regions of China based on socio-economic factors[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2020, 37(6): 169-185.
- [11] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择: 基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73-88.
SHAO S, LI X, CAO J H, et al. Economic policy choices for haze pollution control in China: from the perspective of spatial spillover effect[J]. Economic Research Journal, 2016, 51(9): 73-88.
- [12] ZHENG M, SALMON L G, SCHAUER J J, et al. Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(22): 3967-3976.
- [13] LI J F, SONG Y, MAO Y, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during the harvest season in Eastern China's agricultural regions[J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 442-448.
- [14] LIU G, LI J H, WU D, et al. Chemical composition and source apportionment of the ambient PM_{2.5} in Hangzhou, China[J]. Particology, 2015, 18: 135-143.
- [15] LI L F, ZHANG J H, QIU W Y, et al. An ensemble spatiotemporal model for predicting PM_{2.5} concentrations[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(5): 549.
- [16] 徐伟嘉, 何芳芳, 李红霞, 等. 珠三角区域 PM_{2.5} 时空变异特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27(9): 951-957.
XU W J, HE F F, LI H X, et al. Spatial and temporal variations of PM_{2.5} in the Pearl River Delta[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(9): 951-957.
- [17] GALLERO F J G, VALLEJO M G, UMBRÍA A, et al. Multivariate statistical analysis of meteorological and air pollution data in the 'campo de Gibraltar' region, Spain[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 119(1/2/3): 405-423.
- [18] TRAN H N Q, MÖLDERS N. Investigations on meteorological conditions for elevated PM_{2.5} in Fairbanks, Alaska[J]. Atmospheric Research, 2011, 99(1): 39-49.
- [19] 彭岩, 赵梓如, 吴婷娴, 等. PM_{2.5} 浓度预测与影响因素分析[J]. 北京邮电大学学报, 2019, 42(6): 162-169.
PENG Y, ZHAO Z R, WU T X, et al. Prediction of PM_{2.5} Concentration Based on Ensemble Learning[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019, 42(6): 162-169.
- [20] FENG X, LI Q, ZHU Y J, et al. Artificial neural networks forecasting of PM_{2.5} pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation[J]. Atmospheric Environment, 2015, 107: 118-128.
- [21] PESARAN H H, SHIN Y. Generalized impulse response analysis in linear multivariate models[J]. Economics Letters, 1998, 58(1): 17-29.
- [22] 汪官镇, 刘金培, 陈华友, 等. 基于 VAR 模型的 PM_{2.5} 与其它空气污染物的动态关系分析[J]. 大气与环境光学学报, 2016, 11(2): 91-102.
WANG G Z, LIU J P, CHEN H Y, et al. Analysis of dynamic relationship between PM_{2.5} and other air pollutants based on VAR model[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(2): 91-102.
- [23] 宋佳钰. 哈尔滨市大气污染状况和治理措施的调查分析[J]. 绿色科技, 2017(20): 61-64.
SONG J Y. Investigation and analysis of air pollution situation and control measures in Harbin[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017(20): 61-64.
- [24] WEI Q B, ZHANG L J, DUAN W B, et al. Global and geographically and temporally weighted regression models for modeling PM_{2.5} in Heilongjiang, China from 2015 to 2018[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(24): 5107.
- [25] 郑煜, 邓兰. 基于 PLS1 的哈尔滨市 PM_{2.5} 与空气污染物相关性分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1953-1957.
ZHENG Y, DENG L. Correlation analysis based on PLS1 between PM_{2.5} and air pollutants in Harbin City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(12): 1953-1957.
- [26] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 夏季持续高温天气对北京市大气细粒子 (PM_{2.5}) 的影响[J]. 环境科学, 2002, 23(4): 33-36.
SONG Y, TANG X Y, ZHANG Y H, et al. Effects on fine particles by the continued high temperature weather in Beijing[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2002, 23(4): 33-36.
- [27] 王燕. 时间序列分析: 基于 R[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
- [28] 朱长存, 田雅娟, 白云超. 计量经济学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [29] 高铁梅. 计量经济分析方法与建模: EVIEWS 应用及实例[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [30] 明莉. 浅析哈尔滨市大气污染防治问题[C]//新形势下环境法的发展与完善——2016 年全国环境资源法学研讨会(年会)论文集. 武汉: [出版者不详], 2016: 672-677.
- [31] SUN X Z, WANG K, LI B, et al. Exploring the cause of PM_{2.5} pollution episodes in a cold metropolis in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120275.
- [32] 刘金培, 汪官镇, 陈华友, 等. 基于 VAR 模型的 PM_{2.5} 与其影响因素动态关系研究: 以西安市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5):

78-84.

LIU J P, WANG G Z, CHEN H Y, et al. Dynamic relationship between PM_{2.5} and its influence factors in Xi'an City based on the VAR model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 78-84.

[33] YAO Y R, HE C, LI S Y, et al. Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China; Daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 384-394.

[34] 张佐, 陈贵词, 丁咏梅. 基于 VAR 模型对武汉 PM_{2.5} 及其影响因素的研究[J]. 湖北工程学院学报, 2018, 38(6): 78-84.

ZHANG Z, CHEN G C, DING Y M. Study on the relationship between PM_{2.5} and its influencing factors in Wuhan based on VAR[J]. Journal of Hubei Engineering University, 2018, 38(6): 78-84.

[35] 房文旭, 宋维薇, 梁宇暄, 等. 哈尔滨市供暖期 PM_{2.5} 组分特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3794-3802.

FANG W X, SONG W W, LIANG Y X, et al. Chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during heating period in Harbin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(10): 3794-3802.

Analysis of impact factors of PM_{2.5} in Harbin based on multivariate time series

Zhen Zhen^{1a,b}, Liu Jiayu^{1a}, Niu Yazhou^{1a}, Feng Xinyue^{1a}, Wei Qingbin^{2,1b}

(1. a. School of Forestry; b. Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Air pollution have seriously endangered public health. To explore the relationship among PM_{2.5}, the other air pollutants and meteorological factors in Harbin, this paper implemented a vector autoregressive (VAR) model of PM_{2.5} using daily air quality data (SO₂, NO₂, PM₁₀, CO and O₃) and meteorological data (average air temperature (TA), extreme wind speed (EWS), cumulative precipitation (H), sunshine duration (SH) and average pressure (P)) of Harbin from 2013 to 2018. A generalized impulse response function and variance decomposition based on the optimal model VAR(2) were implemented to analyze the effects of above factors on PM_{2.5}. Results showed that CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀ would promote the concentration of PM_{2.5}. O₃, TA, EWS and H had different effects on PM_{2.5} in different periods. In the short term, TA and O₃ would promote the concentration of PM_{2.5} due to the photochemical action; EWS and H would reduce the concentration of PM_{2.5} in the short term, however, EWS would promote the concentration of PM_{2.5}, which was related to the ground dust caused by the increase of EWS. In the long term, the increase of TA and SH tended to increase PM_{2.5} concentration, which was related to the seasonal variation characteristics of Harbin. When controlling PM_{2.5} in Harbin, a variety of measures should be taken into account comprehensively, such as adjusting industrial structure and developing alternatives energy.

Keywords: PM_{2.5}; time series; VAR; generalized impulse response function; variance decomposition

[责任编辑 赵晓华 陈留院]