

基于 VAR 模型的重庆市大气污染物分析及研究

安 军^{a,b}, 王 丹^a

重庆工商大学 a. 数学与统计学院; b. 重庆市社会经济和应用统计重点实验室, 重庆 400067

摘 要:目的 研究重庆市首要空气污染物 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 的动态影响关系, 为政府制定防治大气污染措施及相关政策提供有价值的建议。方法 收集重庆市 2021-05-01—2021-10-31 日的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 这 6 项大气污染物的日浓度数据, 利用 Eviews8.0 软件, 对原始数据进行序列平稳性检验; 根据 Granger 因果检验结果选择变量, 建立时间序列 VAR 模型, 并检验模型的稳定性; 利用广义脉冲响应分析和方差分解分析, 研究各污染物浓度对 $PM_{2.5}$ 的动态影响及相对重要性。结果 Granger 因果检验表明: PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因, CO 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因; 广义脉冲响应分析表明: NO_2 对 $PM_{2.5}$ 的影响最大; 方差分解分析表明: NO_2 的浓度对 $PM_{2.5}$ 的影响最大; O_3 对 $PM_{2.5}$ 的影响次之, 对 SO_2 的影响作用最小。所以, 从长期影响效应看, NO_2 对 $PM_{2.5}$ 具有长期较大的影响, SO_2 对 $PM_{2.5}$ 的影响最弱。结论 防治 $PM_{2.5}$ 对重庆市空气的污染应着重控制 NO_2 的污染, 因此, 政府应大力发展绿色交通, 控制交通污染; 大力监管高污染行业, 将烟雾、粉尘、颗粒物等排放量较大的行业作为工业污染源治理的重点; 大力发展清洁能源, 加快化石燃料替代资源的开发利用。

关键词: $PM_{2.5}$; VAR 模型; 广义脉冲响应; 方差分解分析

中图分类号: F064.1; X513; X821 文献标识码: A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0005.010

Analysis and Study of Air Pollutants in Chongqing Based on VAR Models

AN Jun^{a,b}, WANG Dan^a

a. School of Mathematics and Statistics; b. Chongqing Key Laboratory of Social Economic and Applied Statistics, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract: Objective The dynamic impact relationships between $PM_{2.5}$ (the primary air pollutants in Chongqing) and PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO and O_3 were studied to provide valuable suggestions for the government to formulate air pollution prevention and control measures and related policies. **Methods** The daily concentration data of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO and O_3 were collected from May 1, 2021 to October 31, 2021 in Chongqing, and the original data were tested for sequence stationarity using software of Eviews 8.0. Variables were selected based on the results of Granger causality tests, time series VAR models were developed and the stability of the models was tested. Generalized impulse response analysis and variance decomposition analysis were used to investigate the dynamic effects and relative importance of each pollutant concentration on $PM_{2.5}$. **Results** The results of the Granger causality test showed that PM_{10} , SO_2 , NO_2 and O_3 were the Granger causes of $PM_{2.5}$, and CO was not the Granger cause of $PM_{2.5}$. Generalized impulse response analysis showed that NO_2 had the greatest effect on $PM_{2.5}$. Variance decomposition analysis showed that the concentration of NO_2 had the

收稿日期: 2022-11-04 修回日期: 2022-12-06 文章编号: 1672-058X(2023)05-0072-09

基金项目: 重庆工商大学重点平台开放项目(KFJJ2018099); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTC2020JCYJ-MSXMX0328); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202000838); 重庆市社会科学规划重点委托项目(2020WT24); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(20YJA910002); 国家社会科学基金后期资助一般项目(21FTJB002)。

作者简介: 安军(1964—), 男, 四川安岳人, 副教授, 从事概率统计研究。

引用格式: 安军, 王丹. 基于 VAR 模型的重庆市大气污染物分析及研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(5): 72—80.
AN Jun, WANG Dan. Analysis and study of air pollutants in Chongqing based on VAR models[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(5): 72—80.

largest effect on $PM_{2.5}$, O_3 had the second largest effect on $PM_{2.5}$ and SO_2 had the smallest effect. Therefore, in terms of the long-term effect, NO_2 has a large long-term effect on $PM_{2.5}$, while SO_2 has the weakest effect on $PM_{2.5}$. **Conclusion** The prevention and control of $PM_{2.5}$ pollution in the air in Chongqing should focus on controlling NO_2 pollution. Therefore, the government should vigorously develop green traffic and control traffic pollution, vigorously supervise and regulate high-polluting industries and make industries with high emissions of smoke, dust, and particulate matter the focus of industrial pollution source governance, and vigorously develop clean energy and accelerate the development and utilization of alternative fossil fuel resources.

Keywords: $PM_{2.5}$; VAR model; generalized impulse response; analysis of variance decomposition

1 引言

众所周知,空气质量的优劣与公众健康、交通安全和区域经济的可持续发展等问题高度相关。据重庆市生态环境局官方网站显示,重庆市首要大气污染物为 $PM_{2.5}$,即空气动力学当量直径小于等于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物。 $PM_{2.5}$ 含大量的有毒有害物质,在大气中停留时间长,输送距离远,并深入到人的细支气管和肺泡,引发支气管炎或哮喘,甚至肺癌等疾病,严重危害人体健康。党中央、国务院高度重视防治大气污染,保障公众健康,推进生态文明建设,促进经济社会可持续发展。1987年,全国人大通过了首部《中华人民共和国大气污染防治法》(以下简称《大气污染防治法》)。2017年,重庆市人大常委会批准了《重庆市大气污染防治条例》,以保障《大气污染防治法》的有效贯彻和实施。从中央到地方,各级政府都将防治大气污染指标纳入年度目标考核。例如,2014年国务院办公厅印发了《大气污染防治行动计划实施情况考核办法(试行)的通知》,规定重庆市以 $PM_{2.5}$ 年均浓度下降比例作为空气质量改善年度考核指标^[1]。

空气质量优劣对旅游业和地区经济发展的影响也不容忽视。旅游业发展高度依赖自然资源与生态环境,暴露于特定的空气污染环境会威胁旅游者的身心健康,使得空气质量成为影响游客目的地选择的潜在外因^[2]。西方人对将中国作为旅游目的地的想法,特别关注了空气污染问题,空气质量危机的观点对目的地形象以及他们访问中国的意图产生了严重的消极影响^[3]。根据重庆市文化和旅游发展委员会公布的数据显示,2021年重庆市旅游产业实现增加值1 076.09亿元,增速为9.9%,占全市GDP比重3.9%^[4]。文旅部发布的报告显示,2021年重庆市旅游接待人数在全国各省(直辖市)排名列第六位^[5]。2022年6月20日,郑

渝高铁实现全线贯通运营后,“重庆”在全国的旅游热度直线上升。去哪儿平台显示,郑渝高铁开通后,“重庆”在全平台搜索排名中跃升第一,连续一周保持在前三名^[6]。因此,研究重庆市 $PM_{2.5}$ 与其他大气污染物的动态关系,对于综合防治大气污染,推进城市生态文明建设,促进旅游业和社会经济持续发展,吸引海内外游客,加快重庆“国际消费中心城市”建设等方面都具有重要的意义。

有关空气污染 $PM_{2.5}$ 的研究受到了许多学者的重视。贾海文等^[7]利用分位数回归分析方法研究了西安市大气污染物 $PM_{2.5}$ 的浓度与其他污染物如 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 浓度的相关性;宋红凤等^[8]运用主成分分析法研究了杭州市 $PM_{2.5}$ 与其他污染物的相关性;张佐等^[9]运用向量自回归模型分析了武汉市 $PM_{2.5}$ 与气温、风速、降雨及大气污染物的动态影响及关系;徐伟嘉等^[10]分析了珠三角8个区域监测点的监测数据,运用统计学方法对 $PM_{2.5}$ 时空变异特征进行了研究,认为 $PM_{2.5}$ 的分布具有较强的空间自相关性;陈铭浩^[11]采用北京、天津、秦皇岛、邯郸、唐山以及保定等6个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度数据,运用VAR模型研究它们对北京市 $PM_{2.5}$ 浓度的动态影响,认为保定市的 $PM_{2.5}$ 浓度对北京市影响最大;Liang等^[12]运用半参数模型方法对北京市 $PM_{2.5}$ 污染进行了研究,认为华北平原以烧煤为主的冬季供暖是北京市 $PM_{2.5}$ 污染的主要原因;柴为涛等^[13]运用时间序列自回归移动平均(ARMA)方法对成都市空气污染指数进行了分析,认为成都市空气质量具有夏季良好、冬季较差的季节性变化特征;李为东等^[14]分别运用时间序列自回归移动平均(ARMA)模型和向量自回归(VAR)模型对北京市空气质量数据进行分析,认为 PM_{10} 对 $PM_{2.5}$ 的影响最为明显且持续时间长;汪官镇等^[15]运用VAR模型对西安市 $PM_{2.5}$ 与其他

空气污染物的关系进行了研究,认为 SO_2 、 NO_2 、 CO 浓度的增加会引起西安市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续较长时间的增加,其中 SO_2 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响较大;甄贞等^[16]运用 VAR 模型对哈尔滨空气质量指数进行了研究,认为 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 CO 浓度对 PM_{10} 的浓度有较大的影响;黄厘博^[17]运用机器学习方法,选取重庆市 2014 年至 2019 年空气质量数据,比较了随机森林、XGBoost、Stacking 等 3 种 $\text{PM}_{2.5}$ 短期预测模型的优良性,认为 Stacking 模型有较好的预测精度;黄伟等^[18]通过空气质量监测数据的分析和研究,对 2005 年以来重庆市“蓝天行动”实施的历史回顾,总结了重庆市环境空气污染治理监管的成果和经验,提出了新一轮“蓝天行动”(2018—2022 年)以控制细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 污染和减少 O_3 污染为重点,以降低氮氧化物浓度为突破点,坚持全民共治、源头防治为目标的观点。

已有的研究方法主要有两种,一是静态分析法,即利用多元线性回归模型、分位数回归模型、主成分分析法、半参数模型、机器学习等统计方法,对 $\text{PM}_{2.5}$ 与其他污染物的相关性进行研究,或利用模型进行预测,或对气象因素和时空分布特征进行研究等;二是动态分析法,即运用时间序列分析 ARMA 模型或 VAR 模型,研究 $\text{PM}_{2.5}$ 日浓度数据的时变规律,或研究 $\text{PM}_{2.5}$ 与其他大气污染物的动态关系,从而找出影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要因素。

选取重庆市 2021-05-01—10-31 日(旅游旺季) $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 这 6 项大气污染物的日浓度数据,建立向量自回归 VAR 模型,运用时间序列分析理论研究重庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 与其他大气污染物之间的动态关系,找出影响重庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度变化的因素,从统计学角度为政府科学制定防治大气污染政策提出有价值的建议。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 向量自回归(VAR)模型

VAR 模型是将系统中多个内生变量的当期取值看作各内生变量滞后值的函数来构造的向量自回归模型,其主要作用在于进行 Granger 因果检验,并通过冲击响应研究多个内生变量之间的动态影响。该模型的基本形式是

$$Y_t = A_0 + A_1 Y_{t-1} + A_2 Y_{t-2} + \cdots + A_p Y_{t-p} + e_t \quad (1)$$

其中,

$$Y_t = \begin{bmatrix} y_{1t} \\ y_{2t} \\ \vdots \\ y_{nt} \end{bmatrix}, e_t = \begin{bmatrix} e_{1t} \\ e_{2t} \\ \vdots \\ e_{nt} \end{bmatrix}, A_0 = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ \vdots \\ a_{n0} \end{bmatrix}$$

$$A_k = \begin{bmatrix} a_{11}(k) & a_{12}(k) & \cdots & a_{1n}(k) \\ a_{21}(k) & a_{22}(k) & \cdots & a_{2n}(k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1}(k) & a_{n2}(k) & \cdots & a_{nn}(k) \end{bmatrix}$$

$$k = 1, 2, \cdots, p$$

y_{it} 是所关注的变量, a_{i0} 是截距项, $a_{ij}(k)$ 是第 i 个方程中 $y_{j,t-k}$ 项所对应的自回归系数,各个 e_{ij} 是独立同分布的随机扰动项,即 $e_{ij} \sim \text{i. i. d.}(0, \sigma_i^2)$ 。如果不同方程的随机扰动项是相关的,即 e_{it} 和 e_{jt} 相关($i \neq j$),则随机扰动项的协方差矩阵 $\Sigma = E[e_t e_t^T] = (\sigma_{ij})_{n \times n}$ 是正定对称矩阵,其中 $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}(i, j = 1, 2, \cdots, n)$ 。

基于 VAR 模型的实证研究往往不侧重于对估计参数的解释,而是侧重于通过脉冲响应函数和方差分解方法研究内生变量的动态影响及其关系,需要把平稳的 VAR(p)模型式(1)的表达式化成如下 VMA(∞)表达式

$$Y_t = \mu + \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k e_{t-k} \quad (2)$$

其中, $\mu = EY_t$ 是 $n \times 1$ 的列向量。检验内生变量序列 $\{Y_t\}$ 的平稳性很重要,在不平稳的条件下,还可能发生伪回归的情况,导致所建立的模型没有意义。所以,在获取数据后,首先就要对原始序列进行平稳性检验,通常使用增广迪基-福勒单位根检验,简称 ADF 检验法。如果序列平稳即可以建立 VAR 模型;如果序列不平稳,则通常对序列进行差分处理。其次,确定模型的最优滞后期数及参数估计,常用 FPE(最终预测误差)准则,或 AIC、SC、HQ 信息量最小准则,或 LR(似然比)检验法来决定滞后期数。在实证分析中,往往将多个准则同时使用,按“少数服从多数”的原则选取最优滞后期数。参数估计常用最大似然估计法(MLE)或最小二乘法(OLS),在随机扰动项 $e_t \sim \text{i. i. d. } N(0, \Sigma)$ 的条件下,MLE 和 OLS 获得的系数是相同的。Granger 因果检验主要用于检验某个变量的所有滞后项是否对另一个变量的当期值有显著影响,换句话说,某个变量是否可以用来提高对另一个变量的预测能力。脉冲响应分

析是通过脉冲响应函数研究对某个变量在第 t 期施加一个单位的冲击(随机扰动),在其他条件保持不变的情况下,通过系统传导,对另一个变量第 $t+h$ 期的值能产生多大的影响。方差分解分析是将一个内生变量的方差分解到各个扰动项上,从而考察各个扰动因素(即外来信息)对内生变量的相对重要性^[19-21]。

2.2 数据选取

各种大气污染物对 $PM_{2.5}$ 浓度均有一定的影响。为了研究空气动力系统的传导关系,并考虑数据的可得性,本文选取环保部确认的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 这 6 种大气污染物指标,收集 2021-05-01—10-31 的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 的日浓度数据作

为样本数据进行分析。数据来源于中国空气质量在线监测分析平台。

3 重庆市 $PM_{2.5}$ 与其他大气污染物关系的实证分析

3.1 平稳性检验

以下用 Eviews8.0 软件对所选取的数据进行统计分析。为了确保时间序列的平稳性,首先对序列进行 ADF 单位根检验,如果 ADF 检验统计量小于所给显著性水平的临界值,则拒绝原假设。检验结果如表 1 所示,各变量 ADF 统计量值均小于 5%显著性水平的临界值,拒绝原假设,说明各内生变量均为平稳序列。

表 1 原始变量平稳性检验结果
Table 1 Results of stability test for original variables

污染物	ADF 统计量	各显著水平下的临界值			P 值	(C, T, K)	结论
		1%	5%	10%			
$PM_{2.5}$	-5.445 51	-3.466 2	-2.877 2	-2.575 2	0.000 0	C00	平稳
PM_{10}	-5.927 4	-3.466 2	-2.877 2	-2.575 2	0.000 0	C00	平稳
SO_2	-7.332 5	-3.466 2	-2.877 2	-2.575 2	0.000 0	C00	平稳
NO_2	-5.628 1	-3.466 2	-2.877 2	-2.575 2	0.000 0	C00	平稳
CO	-8.685 7	-3.466 2	-2.877 2	-2.575 2	0.000 0	C00	平稳
O_3	-5.745 9	-3.466 2	-2.877 2	-2.575 2	0.000 0	C00	平稳

注:(C, T, K)中的 C 为含截距,T 为含趋势,K 为滞后期,0 为没有截距或趋势。

3.2 Granger 因果检验

Granger 因果检验是检验某个变量的滞后值,即过往信息,对被解释变量是否具有预测能力,这是能否建立脉冲响应函数的前提。Granger 因果关系是一种统计上而非逻辑意义上的因果关系,它指先发生的事情对后发生的事情会产生一定的影响^[22]。

由表 2 可知,检验拒绝了 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因,表明 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 的浓度能够为预测 $PM_{2.5}$ 浓度提供有效信息;而检验接受了 $PM_{2.5}$ 不是 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 的 Granger 原因,表明它们的取值存在单向 Granger 因果关系。而 CO 与 $PM_{2.5}$ 的双向检验都不显著,因此,政府应着重从防治 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 来治理 $PM_{2.5}$ 的空气污染问题,防治 CO 不应该是治理 $PM_{2.5}$ 的重点。

表 2 Granger 因果关系检验结果

Table 2 Results of Granger causality test

因果关系原假设	滞后 期数	F 统 计量	P 值	检验 结果
$PM_{2.5}$ 不是 PM_{10} 的 Granger 原因	2	2.738 9	0.067 4	不拒绝
PM_{10} 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因	2	3.882 5	0.022 4	拒绝
$PM_{2.5}$ 不是 SO_2 的 Granger 原因	2	0.919 4	0.400 6	不拒绝
SO_2 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因	2	4.985 8	0.007 8	拒绝
$PM_{2.5}$ 不是 NO_2 的 Granger 原因	2	6.584 3	0.001 7	拒绝
NO_2 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因	2	15.534	0.000 0	拒绝
$PM_{2.5}$ 不是 CO 的 Granger 原因	2	0.144 5	0.865 5	不拒绝
CO 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因	2	1.068 6	0.345 7	不拒绝
$PM_{2.5}$ 不是 O_3 的 Granger 原因	2	4.404 5	0.013 6	拒绝
O_3 不是 $PM_{2.5}$ 的 Granger 原因	2	8.508 5	0.000 3	拒绝

3.3 VAR 模型的构建

在得知序列平稳和进行 Granger 因果检验之后,选取与 $PM_{2.5}$ 有 Granger 因果关系的 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 建立 VAR 模型,首先要确定 VAR 模型的最优滞后期数。如表 3 所示,根据不同的判断准则,带 * 者为 Eviews 软件推荐的最优滞后期数。按照“少数服从多数”的原则,带 * 最多者可选取为最优滞后期数。这

里,滞后 1 期和滞后 2 期同时带有 2 个 *, 都可以是“最优选择”。当模型解释变量越多时,对被解释变量解释能力越强。在线性模型中,“解释能力”通常由可决系数来判断,即可决系数越大,解释能力越强。由 Eviews 计算得知,滞后 2 期的可决系数是 0.640 896,滞后期为 1 可决系数是 0.559 578,故选取该模型的最优滞后期数为 2。

表 3 VAR 模型滞后期数的选择

Table 3 Selection of lag numbers of VAR model

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	-265 1.564	NA	8 875 810	30.188 22	30.278 30	30.224 76
1	-2 395.739	494.206 5	644 329.6	27.565 22	28.105 64*	27.784 41*
2	-2 366.572	54.689 16	614 946.6*	27.517 86*	28.508 64	27.919 71
3	-2 342.751	43.310 15	624 305.0	27.531 26	28.972 39	28.115 78
4	-2 320.506	39.182 02	646 218.1	27.562 57	29.454 05	28.329 74
5	-2 296.395	41.098 42*	656 167.8	27.572 67	29.914 50	28.522 50
6	-2 281.744	24.140 03	743 744.0	27.690 28	30.482 46	28.822 77
7	-2 268.845	20.521 61	862 562.7	27.827 78	31.070 32	29.142 94
8	-2 253.720	23.202 75	978 899.8	27.940 00	31.632 90	29.437 82

基于 MLS 的参数估计结果得到 VAR(2) 模型如下:

$$\begin{pmatrix} PM_{2.5t} \\ NO_{2t} \\ O_{3t} \\ PM_{10t} \\ SO_{2t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.39 \\ 7.89 \\ 19.10 \\ -3.28 \\ 2.21 \end{pmatrix} + \\
 \begin{pmatrix} 0.38 & 0.54 & 0.04 & -0.03 & 0.53 \\ -0.17 & 1.02 & 0.04 & -0.05 & 0.12 \\ -1.86 & 2.58 & 0.68 & -0.13 & -3.08 \\ -0.33 & 0.96 & -0.10 & 0.44 & 0.53 \\ -0.11 & 0.10 & 0.01 & 0.03 & 0.40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} PM_{2.5t-1} \\ NO_{2t-1} \\ O_{3t-1} \\ PM_{10t-1} \\ SO_{2t-1} \end{pmatrix} + \\
 \begin{pmatrix} -0.18 & -0.21 & -0.05 & 0.22 & 0.22 \\ -0.04 & -0.28 & -0.05 & 0.22 & -0.24 \\ -1.82 & -0.73 & 0.00 & 1.55 & 1.90 \\ -0.13 & -0.41 & -0.09 & 0.31 & 0.32 \\ -0.07 & -0.00 & -0.02 & 0.06 & 0.15 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} PM_{2.5t-2} \\ NO_{2t-2} \\ O_{3t-2} \\ PM_{10t-2} \\ SO_{2t-2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{1t} \\ e_{2t} \\ e_{3t} \\ e_{4t} \\ e_{5t} \end{pmatrix} \quad (3)$$

现在检验式(3)的平稳性。VAR(2)模型平稳的条

件是特征方程 $|\lambda^2 I - A_1 \lambda - A_2| = 0$ 的全部根,即特征根,都在单位圆内。根据 Eviews 软件计算得到滞后 2 期的 AR 根图,如图 1 所示。可以发现,所得 VAR(2) 模型的所有特征值都在单位圆内,即所得的 VAR(2) 模型是平稳的,可以着手进一步统计分析。

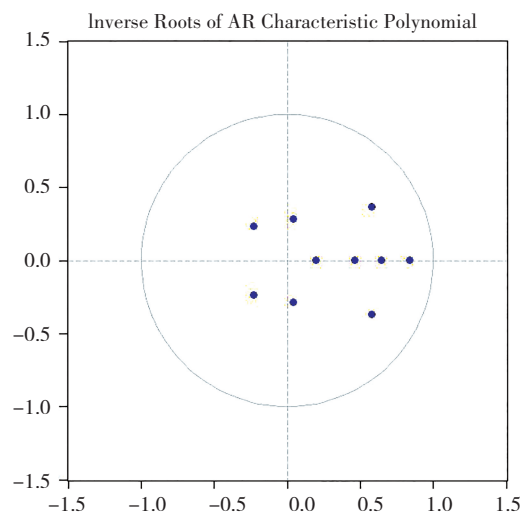


图 1 VAR(2) 模型 AR 特征根根图

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

3.4 广义脉冲响应分析

脉冲响应分析是研究对某个内生变量施加一个单

位的冲击,在其他条件保持不变的情况下,通过系统传导,对另一个变量产生了多大的影响,从而得到各个变量对某个内生变量动态影响的重要性。传统的正交脉冲响应分析可能由于变量顺序的变化而导致结果不同,所以本文选择广义脉冲响应分析^[18]。

图 2、图 3、图 4 中实线为脉冲响应函数图像,表示空气质量指数对各影响因子冲击产生的响应,虚线表示正负标准差的区间范围。

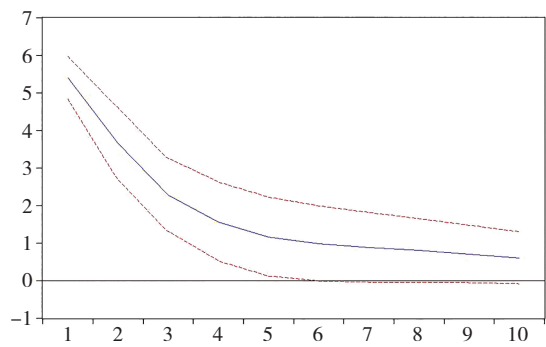
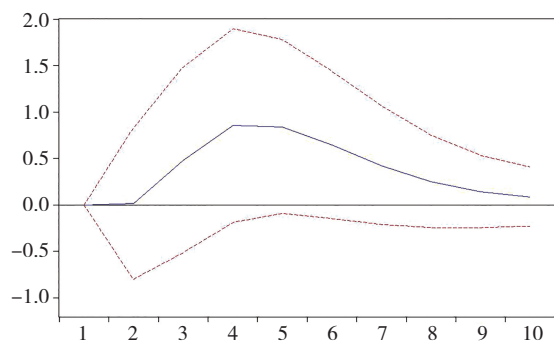
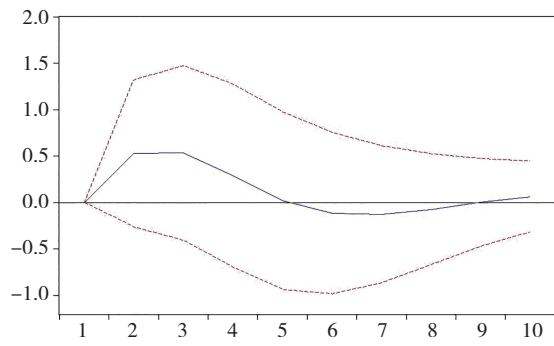


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 对 $\text{PM}_{2.5}$ 冲击脉冲响应结果

Fig. 2 Response results of $\text{PM}_{2.5}$ to $\text{PM}_{2.5}$ shock pulse



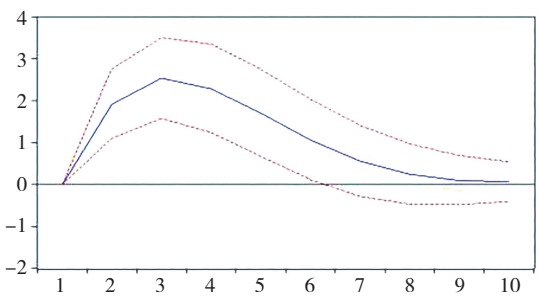
(a) $\text{PM}_{2.5}$ 对 PM_{10} 的响应



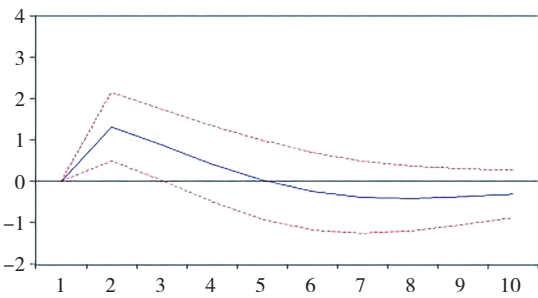
(b) $\text{PM}_{2.5}$ 对 SO_2 的响应

图 3 $\text{PM}_{2.5}$ 对 PM_{10} 、 SO_2 冲击脉冲响应结果

Fig. 3 Response results of $\text{PM}_{2.5}$ to PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ to SO_2 shock pulses



(a) $\text{PM}_{2.5}$ 对 NO_2 的响应



(b) $\text{PM}_{2.5}$ 对 O_3 的响应

图 4 $\text{PM}_{2.5}$ 对 NO_2 、 O_3 冲击脉冲响应结果

Fig. 4 Response results of $\text{PM}_{2.5}$ to NO_2 and $\text{PM}_{2.5}$ to O_3 shock pulses

由图 2 可知,给定 $\text{PM}_{2.5}$ 自身一个单位的正向冲击, $\text{PM}_{2.5}$ 随着期数的增加冲击不断减小,第 1 期最大,有 5.4% 的正向冲击影响,第 10 期仍有 0.6% 的正向冲击。由图 3 可知,给定 PM_{10} 一个单位的正向冲击,前 2 期冲击作用为 0,直到第 4 期增加到 0.85%,第 5 期持平,后冲击逐渐减弱,第 10 期仅有 0.08% 的正向冲击作用;给定 SO_2 一个单位的正向冲击,第 2 期增加到极值 0.53%,第 3 期持平,后减弱至第 5 期冲击为 0,第 5 期到第 9 期负向冲击先增加后减弱,其中第 7 期达到极值 -0.13%,第 9 期冲击为 0,而第 10 期的冲击达到 0.06%。由图 4 可知,给定 NO_2 一个单位的正向冲击, $\text{PM}_{2.5}$ 呈现先增加后减弱的冲击,且具有长期正向冲击效应,第 1 期到第 2 期反应最灵敏,在第 2 期时冲击达到 1.9%,第 3 期达到最大值 2.5%,第 3 期后冲击不断减弱,第 10 期仍有 0.1% 的正向冲击;给定 O_3 一个单位的正向冲击, $\text{PM}_{2.5}$ 从第 1 期到第 2 期冲击反应最灵敏,冲击反应从 0 增加到 1.3%,后正向冲击逐渐减弱至第 5 期为 0,之后随着期数增加冲击不断减弱至第 10 期 -0.3%。

总体来看,给定各污染物一个单位的冲击之后, $\text{PM}_{2.5}$ 并没有迅速作出反应,而是有一个相对滞后期。

在前 3 期各污染物对 $PM_{2.5}$ 的影响较明显;在第 10 期时,除开 $PM_{2.5}$ 自身的影响, NO_2 对 $PM_{2.5}$ 的冲击最大, NO_2 对 $PM_{2.5}$ 的冲击具有长期正向冲击效应。从整个滞后期来看,治理 $PM_{2.5}$ 应重点加强对 NO_2 的治理。

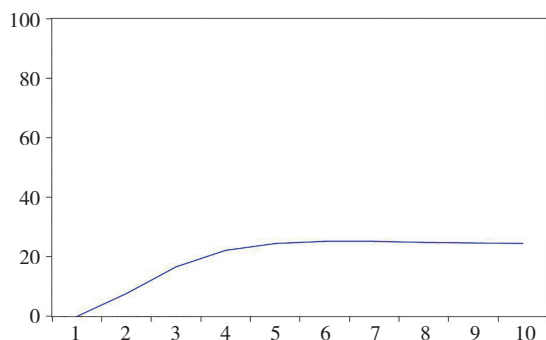
3.5 方差分解分析

VAR 模型的另一个重要意义在于对某一内生变量的变化进行分解,以评价不同内生变量对其未来变化影响的重要程度,这就是所谓的方差分解分析^[23]。本文对 $PM_{2.5}$ 进行方差分解,分析各污染物浓度对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,得到结果如表 4 和图 5 所示。

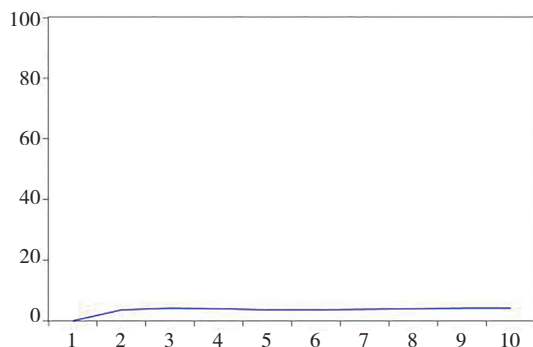
表 4 方差分解

Table 4 Variance decomposition

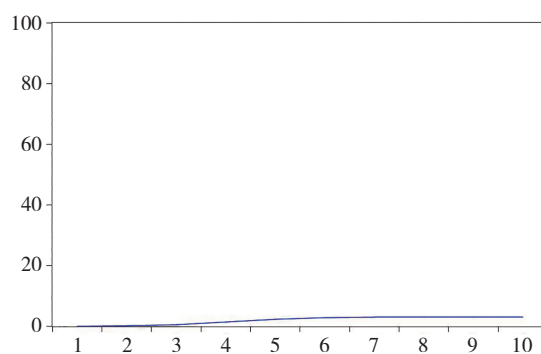
Period	S.E.	NO_2	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2
1	4.110 848	0.000 000	0.000 000	0.000 000	100.000 0	0.000 000
2	5.575 653	7.654 280	3.567 646	0.000 280	88.200 52	0.577 270
3	6.164 616	16.577 88	4.071 697	0.376 151	78.054 58	0.919 692
4	6.454 966	22.005 86	3.815 355	1.373 551	71.880 57	0.924 671
5	6.606 906	24.412 68	3.564 385	2.225 450	68.933 52	0.863 974
6	6.704 776	25.064 86	3.527 060	2.684 074	67.871 29	0.852 710
7	6.774 735	25.004 34	3.657 661	2.860 248	67.618 90	0.858 859
8	6.823 288	24.784 99	3.835 378	2.903 503	67.620 42	0.855 703
9	6.855 581	24.591 93	3.981 232	2.903 420	67.674 80	0.848 621
10	6.876 871	24.454 97	4.076 580	2.895 395	67.724 52	0.848 530



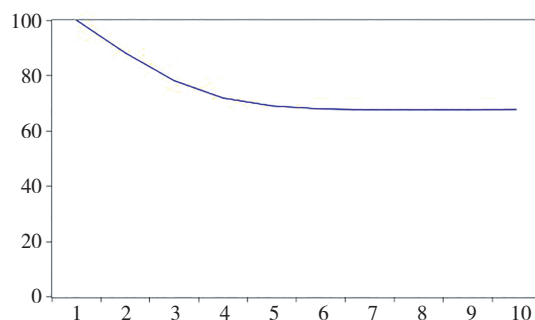
(a) 由 NO_2 引起的 $PM_{2.5}$ 变化百分比



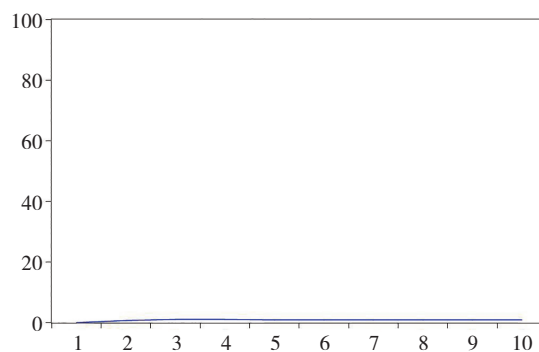
(b) 由 O_3 引起的 $PM_{2.5}$ 变化百分比



(c) 由 PM_{10} 引起的 $PM_{2.5}$ 变化百分比



(d) 由 $PM_{2.5}$ 引起的 $PM_{2.5}$ 变化百分比



(e) 由 SO_2 引起的 $PM_{2.5}$ 变化百分比

图 5 方差分解

Fig. 5 Variance decomposition

由表 4 和图 5 可知,在不同的滞后期下,其他污染物对 $PM_{2.5}$ 的影响程度不同,主要表现为如下: $PM_{2.5}$ 在第 1 期只受自身波动的影响,第 5 期下降到 68.93%,第 5 期之后缓慢下降,到了第 10 期仍然有 67.72% 的影响作用。在其他 5 种污染物中,影响程度依次为 NO_2 、 O_3 、 PM_{10} 、 SO_2 ,其中, NO_2 对 $PM_{2.5}$ 的影响在第 2 期就超过了其他 3 种污染物,到第 6 期增加到 25.06%,此后其占比一直稳定在 24%; PM_{10} 对 $PM_{2.5}$ 的影响在前 2 期很微弱,第 2 期到第 5 期增长迅速,后缓慢增长至第 10 期为 2.89%; O_3 对 $PM_{2.5}$ 的冲击在第 2 期达到 3.57% 之后一直稳定于 3.5% 左右; SO_2 对 $PM_{2.5}$ 的影响最小,在

第2期增加到0.57%,第4期达到最大0.92%,而后一直稳定于0.85%左右。方差分解结果表明,防控 NO_2 污染是防控 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的重要因素。

4 结论与建议

本文以2021-05-01—10-31日重庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 和其他大气污染物的日浓度数据为样本,建立VAR(2)模型展开实证分析,得到以下结论:

(1) Granger 因果检验表明: PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的Granger原因,表明 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度的变化可以解释 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化; CO 不是 $\text{PM}_{2.5}$ 的Granger原因。

(2) 广义脉冲响应分析表明: NO_2 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响最大, NO_2 的变动对 $\text{PM}_{2.5}$ 一直存在正向冲击,在前3期冲击不断增强,后随着时间的推移冲击逐渐减弱,到第10期仍有0.1%的正向冲击作用。

(3) 方差分解分析表明: NO_2 的浓度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响最大,与广义脉冲响应分析结果一致; O_3 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响次之, SO_2 的影响作用最小。因此,治理 $\text{PM}_{2.5}$ 要注重对 NO_2 的治理。

氮氧化物排放问题日益突出,已成为大气污染物的重要来源。现在氮氧化物的主要来源是机动车尾气、工业生产排放和化石燃料排放等。针对以上分析,本文提出以下建议:

大力发展绿色交通,控制交通污染。汽车排放的尾气当中含有大量污染物,汽车尾气不仅对环境造成严重的负面影响,而且对人体健康危害极大。因此应该加强城市公共交通建设,限制高排放车辆通行,提倡使用环保能源汽车,倡导市民们绿色出行。

大力监管高污染行业,对工业污染应从源头治理,将烟雾、粉尘、颗粒物等排放量较大的行业作为工业污染源治理的重点。采用低耗能、低污染的生产工艺,提高各个行业的清洁生产水平,降低污染物产量。对污染物排放前净化处理,对排放前的污染物应用工业净化设备,对其净化后再排放,确保污染防治设施正常运行,污染物稳定达标排放。

大力发展清洁能源,加快化石燃料替代资源的开发利用。要根据我国的实际情况,努力减少化石燃料产能,注重发挥太阳能、风能等新能源的利用,实现可持续发展,保护好大气环境。

参考文献(References):

- [1] 辽宁省人民政府办公厅. 国务院办公厅关于印发大气污染防治行动计划实施情况考核办法(试行)的通知[J]. 辽宁省人民政府公报杂志, 2014(10): 26—29.
General Office of Liaoning Provincial People's Government. Notice of the General Office of the State Council on the Issuance of the Assessment Measures for the Implementation of the Action Plan for the Prevention and Control of Air Pollution (for Trial Implementation), Liaoning Provincial People's Government Gazette [J]. Bulletin of Liaoning Provincial People's Government, 2014(10): 26—29.
- [2] 罗润, 周年兴. 空气质量、旅游者空气质量敏感度对旅游景区客流量的影响机理研究——以南京市为例[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 54—60.
LUO Run, ZHOU Nian-xing. The influence mechanism of air quality and tourists' air quality sensitivity on tourist flow of scenic spots: a case of Nanjing[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 45(3): 54—60.
- [3] BECKEN S, JIN X, ZHANG C, et al. Urban air pollution in China: destination image and risk perceptions[J]. Journal of Sustainable Tourism, 2017, 25(1): 130—147.
- [4] 重庆市文化和旅游发展委员会. 2021年重庆市旅游统计公报[S]. http://whlyw.cq.gov.cn/wlzx_221/sjfb/202204/t20220425_10655394_wap.html. [2022-04-25].
Chongqing Municipal Culture and Tourism Development Committee. Chongqing Tourism Statistics Bulletin for 2021 [S]. http://whlyw.cq.gov.cn/wlzx_221/sjfb/202204/t20220425_10655394_wap.html. [2022-04-25].
- [5] 央广网. 文旅部: 2021年度旅行社国内旅游接待人次浙江排名第一 [N/OL]. http://news.cnr.cn/dj/20220510/t20220510_525822249.shtml. [2022-05-10].
- [6] 光明网. 郑渝高铁开通后重庆地区跃升去哪儿平台搜索第一 [N/OL]. <https://m.gmw.cn/baijia/2022-06/21/1303008026.html>. [2022-06-21].
- [7] 贾海文, 刘静静. 西安市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响因素分析[J]. 能源与环境, 2021, 43(8): 75—80.
JIA Hai-wen, LIU Jing-jing. Analysis of influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Xi'an city[J]. Energy and Environmental Protection, 2021, 43(8): 75—80.
- [8] 宋红凤, 徐登可, 陆丹妮. 基于主成分回归的杭州市 $\text{PM}_{2.5}$ 含量的综合分析[J]. 经济数学, 2020, 37(4): 141—147.
SONG Hong-feng, XU Deng-ke, LU Dan-ni. Comprehensive analysis of $\text{PM}_{2.5}$ content in Hangzhou based on principal

- component regression[J]. *Economic Mathematics*, 2020, 37(4): 141—147.
- [9] 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 Zuo, CHEN Gui-ci, DING Yong-mei. A study on $PM_{2.5}$ and its influencing factors in Wuhan based on VAR model[J]. *Journal of Hubei Engineering College*, 2018, 38(6): 78—84.
- [10] 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 Wei-jia, HE Fang-fang, LI Hong-xia, et al. Spatiotemporal variation characteristics of $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta region[J]. *Environmental Science Research*, 2014, 27(9): 951—957.
- [11] 陈铭浩. 基于 VAR 模型对北京市 $PM_{2.5}$ 的传输特征分析[J]. *广西质量监督导报*, 2019(3): 54—55.
CHEN Ming-hao. Analysis of transmission characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing based on VAR model[J]. *Guangxi Quality Supervision Herald*, 2019(3): 54—55.
- [12] LIANG X, ZOU T, GAO B, et al. Assessing Beijing's $PM_{2.5}$ pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating[J]. *Proc R Soc A*, 2015, 471: 1—20.
- [13] 柴微涛, 宋述军, 宋学鸿. 成都市城区空气污染指数的时间序列分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(4): 485—488.
CHAI Wei-tao, SONG Shu-jun, SONG Xue-hong. Time series analysis of air pollution index in urban areas of Chengdu[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 34(4): 485—488.
- [14] 李为东, 李莉, 徐岩. 基于时间序列分析的北京地区 $PM_{2.5}$ 浓度研究[J]. *运筹学学报*, 2018, 22(2): 115—126.
LI Wei-dong, LI Li, XU Yan. Research on $PM_{2.5}$ concentration in Beijing based on time series analysis[J]. *Journal of Operations Research*, 2018, 22(2): 115—126.
- [15] 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 Guan-zhen, LIU Jin-pei, CHEN Hua-you, et al. Dynamic relationship analysis of $PM_{2.5}$ with other air pollutants based on VAR model[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(2): 91—102.
- [16] 甄贞, 刘佳宇, 牛亚洲, 等. 基于多元时间序列的哈尔滨市 $PM_{2.5}$ 影响因素分析[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 98—107.
ZHEN Zhen, LIU Jia-yu, NIU Ya-zhou, et al. Analysis of factors influencing $PM_{2.5}$ in Harbin City based on multivariate time series[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(1): 98—107.
- [17] 黄厘博. 重庆市主城区空气质量分析及 $PM_{2.5}$ 浓度预测[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
HUANG Li-bo. Air quality analysis and $PM_{2.5}$ concentration prediction in the main urban area of Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [18] 黄伟, 马波峰. 重庆市“蓝天行动”的历史回顾与新一轮实施发展[J]. *环境影响评价*, 2021, 43(2): 30—32.
HUANG Wei, MA Bo-feng. Historical review and new round of implementation of “Blue Sky Action” in Chongqing [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2021, 43(2): 30—32.
- [19] 张成思. 金融计量学: 时间序列分析视角[M]. 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2021.
ZHANG Cheng-si. Financial econometrics: a time series analysis perspective [M]. 3rd ed. Beijing: People's University of China Press, 2021.
- [20] HAMILTON J. Time series analysis [M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [21] LUTKEPOHL H. New introduction to multiple time series analysis [M]. Berlin: Springer-Verlage, 2005.
- [22] 刘玉娇, 吕玉华. 基于非平稳时间序列的 VAR 模型实证分析[J]. *曲阜师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(1): 41—46.
LIU Yu-jiao, LYU Yu-hua. Empirical analysis of VAR model based on non-stationary time series [J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 47(1): 41—46.
- [23] 高明杰, 鲁洪威, 李婷婷, 等. 基于 VAR 模型的中国马铃薯产量波动影响因素分析[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(4): 63—71.
GAO Ming-jie, LU Hong-wei, LI Ting-ting, et al. Analysis of factors influencing potato yield fluctuation in China based on VAR model[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(4): 63—71.