



移动扫码阅读

刘朋,马海搏,陈正元.基于 GAM 的鞍山气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的影响研究[J].能源环境保护,2022,36(4):104-108.

LIU Peng, MA Haibo, CHEN Zhengyuan. Study on the influence of Anshan meteorological conditions on $\text{PM}_{2.5}$ and SO_2 based on GAM[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(4):104-108.

基于 GAM 的鞍山气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的影响研究

刘 朋,马海搏,陈正元

(河南省地质局生态环境地质服务中心,河南 郑州 450053)

摘要:以辽宁鞍山市 2019 年小时气象数据、大气污染物小时数据为基础,基于广义可加模型(GAM),在考虑城市大气污染本底值、月份等混杂因素的情况下构建响应关系模型。引入相对危险度(RR)概念计算定量关系,分析气象因子(风速、温度、相对湿度)的改变对 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 的影响。结果表明:三类气象因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响均存在阈值效应;风速的影响百分率最高,在低于 4 m/s 范围内变化时,每单位增量引起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相对改变量为 -7.63%;温度的增加使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈 U 形变化,其阈值为 10 °C,温度在两个阈值区间引起的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对改变量分别为 -0.56% 与 0.6%;除干燥天气或降雨时,相对湿度的增加多导致城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的升高;当响应变量为 SO_2 时,风速、温度、相对湿度三类气象因子每单位减小量对应的 SO_2 浓度相对改变量分别为 -0.91%、-0.43% 和 0.98%。

关键词:广义可加模型; SO_2 浓度; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度;气象因子;定量关系

中图分类号:X511;X513

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)04-0104-05

Study on the influence of Anshan meteorological conditions on $\text{PM}_{2.5}$ and SO_2 based on GAM

LIU Peng, MA Haibo, CHEN Zhengyuan

(Ecological Environment Geology Service Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: According to the hourly meteorological data and hourly air pollutant data in Anshan City, Liaoning Province in 2019, a response relationship model was established based on the generalized additive model (GAM) considering confounding factors such as the background value of urban air pollution and months. The concept of relative risk (RR) was introduced to calculate the quantitative relationship. The influence of three meteorological factors (wind speed, temperature, relative humidity) on $\text{PM}_{2.5}$ and SO_2 was analyzed. The results show that all the meteorological factors have threshold effects on $\text{PM}_{2.5}$. The influence percentage of wind speed is the highest. When the wind speed changes below 4 m/s, the relative change of $\text{PM}_{2.5}$ concentration per unit increment is -7.63%. The concentration of $\text{PM}_{2.5}$ changes in a U-shape with the increase of temperature. The threshold of temperature is 10 °C, and the relative changes of $\text{PM}_{2.5}$ concentration caused by the temperature are -0.56% below 10 °C and 0.6% higher than 10 °C. When the relative humidity is between 18% and 85%, the increase of relative humidity often leads to the increase of urban $\text{PM}_{2.5}$ concentration. When the response variable is SO_2 , the relative changes of SO_2 concentration corresponding to per unit reduction of wind speed, temperature and relative humidity are -0.91%, -0.43% and 0.98%, respectively.

收稿日期:2022-03-22;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:国家自然科学基金(41771435)

第一作者简介:刘朋(1995—),男,河南郑州人,助理工程师,研究方向为水文地质、工程地质和环境地质。E-mail:3026664762@qq.com

Key Words: Generalized additive model; SO₂ concentration; PM_{2.5} concentration; Meteorological factor; Quantitative relationship

0 引言

鞍山市(40°27′~41°34′, 122°10′~123°41′)位于中国东北地区,是中国重要的钢铁工业基地。由于铁矿、岫岩、玉石矿等矿产资源的开发,大量大气污染物进入空气,对城市空气质量造成了影响。疫情期间,虽然人类生产生活活动大幅减少,但当不利气象条件发生之际依然会引发空气质量预警。因此,气象因子也是影响城市空气质量的关键因素^[1]。而城市空气质量也成为政府相关部门、国内外学者关注的焦点问题^[2-3]。在以往的研究中,多通过对数据进行回归分析或构建对应模型,根据数据变化趋势定性分析气象因子对城市大气污染物的影响^[4-5]。为定量分析气象因子对大气污染物浓度变化的影响,本研究通过收集2019年全年鞍山市大气污染物数据、气象数据,在考虑城市大气污染物浓度本底值、季节变化等混杂因素的同时,以 PM_{2.5}、SO₂ 两类大气污染物为例,利用广义可加模型(GAM)构建鞍山市城市气象因子对大气污染物影响效应的模型,并引入相对危险度(RR)的概念,计算定量关系,最终为城市发展规划、大气污染管理等提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文通过 GAM 构建了鞍山市气象因子与大气污染物间的响应关系,其中气象数据采用国家气候信息中心(<http://data.cma.cn/>) 54339 号气象站点的 2019 年全年数据,包括逐时风速、温度、相对湿度等多项数据,大气污染物浓度数据采用 1753A 号站点监测到的 2019 年全年逐时 PM_{2.5} 及 SO₂ 浓度数据。

1.2 方法

1.2.1 广义可加模型

广义可加模型(Generalized Additive Model, GAM)是广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)的半参数拓展^[6-7],适用于各种不同类型分布的函数分析,可直接拟合响应变量和多个解释变量间的非线性关系,在控制混杂因素、对不同函数进行加和的同时也降低了线性设定带来的模型风险^[8-9]。GAM 的一般形式如下:

$$g(\mu_i) = a + \sum_{j=1}^p f_j(X_j) \quad (1)$$

式(1)中: $g(\mu_i)$ 为连接函数,且二次可导; $f_j(X_j)$ 则代表各种非参数平滑函数,即解释变量; p 为解释变量个数; a 为截距。

1.2.2 模型构建

在构建模型之初,需首先确定响应变量的分布方式。本研究采用频次直方图的形式分析大气污染物数据,得出响应变量的分布特征,以大致确定其连接函数(表1)。其次,为更全面地分析气象因子对大气污染物的影响,本研究选取多种气象因子作为解释变量带入模型,考虑到过多的解释变量可能导致模型的多重共线性问题,本研究采用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)来评价解释变量之间的相关关系,通过 VIF 值筛选气象因子。当 VIF 值越接近于 1,多重共线性越轻,反之越重;当 VIF 值大于 10 时,回归模型则存在严重的多重共线性。综合前人研究成果,最终选择 VIF 检验的临界值为 3, VIF 大于 3 的解释变量将被移除^[10-11]。

表 1 响应变量分布和连接函数

Table 1 Response variable distribution and connection functions

响应变量分布族	连接函数
正态分布	Identity link: $g(z) = z$
二项分布	Logit link: $g(z) = \log(z/(1-z))$
负二项分布	Inverse link: $g(z) = 1/z$
泊松分布	Long link: $g(z) = \log(z)$

同时,城市大气污染物浓度本底值是影响城市大气污染物含量变动的重要原因,也是影响模型结果可靠性的重要混杂因素。考虑到大气污染可能存在滞后性,为获取合适的城市尺度大气污染本底值代替数据,本研究通过拉长污染物数据时间步长,并分别将污染物小时数据对应的当日污染物日平均浓度数据、提前 1~7 d 的日均数据、本周及提前一周的污染物浓度平均数据分别带入模型,选择模型 AIC 值最小时所对应的数据,确定最佳的代替城市大气污染本底值数据^[12-14]。除此之外,本研究也将季节、月份变化作为混杂因素带入模型,以增加模型结果的可靠性。

1.2.3 定量关系计算

以 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 两类大气污染物浓度变化为响应变量,筛选出的气象因子为解释变量,探索鞍山市两类大气污染物浓度与气象因子之间的响应关系。同时引入流行病学中常用的相对危险度 (relative risk, RR) 的概念,结合 GAM 模型构建出气象因子与大气污染物间的响应关系,计算各气象因子每发生单位变化时所对应大气污染物浓度的相对改变量^[15-16]。由此得到 RR 及其 95% 的置信区间 (95% CI) 详见式 (2) 和式 (3):

$$RR = \exp(\beta \times \Delta X) \quad (2)$$

$$RR(95\% CI) = \exp[(\beta \pm 1.96SE) \times \Delta X] \quad (3)$$

式中, β 为回归系数, ΔX 为气象因子的单位变化量, SE 为标准误差。

在其他混杂因子保持不变的条件下,结合 RR 进一步计算出大气污染物浓度改变的百分率。当气象因子在阈值范围内变化 ΔX 单位时,大气污染物改变的百分率 (ER%) 及其 95% 的置信区间 (95% CI) 详见式 (4) 和式 (5):

$$ER\% = (RR - 1) \times 100\% \quad (4)$$

$$ER\%(95\% CI) = (\exp[(\beta \pm 1.96SE) \times \Delta X] - 1) \times 100\% \quad (5)$$

表 3 大气污染物浓度滞后数据对应模型 AIC 值

Table 3 AIC values of the model corresponding to the lag data of air pollutant concentration

	当天	提前 1 d	提前 2 d	提前 3 d	提前 4 d	提前 5 d	提前 6 d	提前 7 d	本周	提前 1 周
$\text{PM}_{2.5}$	13 251	18 760	19 808	19 911	20 010	20 148	20 213	20 284	17 813	19 627
SO_2	5 946	10 992	12 622	12 702	12 893	13 126	12 940	13 145	9 639	11 392

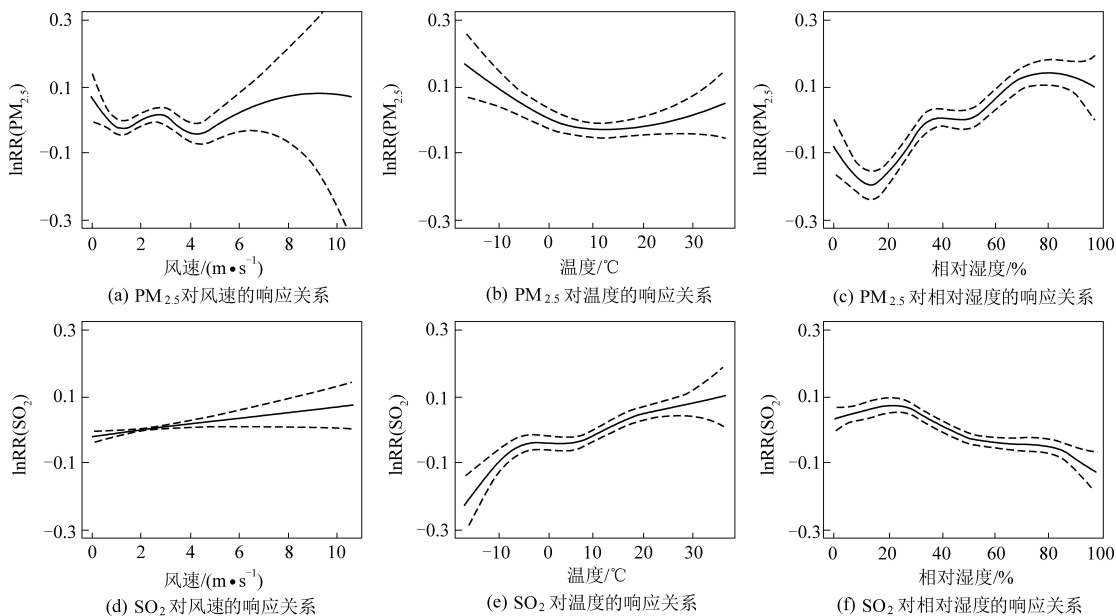


图 1 两类大气污染物浓度对三类气象因子的响应关系图

2 结果与讨论

本研究通过 SPSS 工具计算三类气象因子间的 VIF 值。由表 2 计算结果可知,当响应变量分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 时,对应三类气象因子 VIF (方差膨胀因子) 值均小于设定阈值。因此当响应变量为 $\text{PM}_{2.5}$ 或 SO_2 时,温度、风速、相对湿度三类气象因子可作为解释变量同时带入模型。

表 2 气象因子间 VIF 值

Table 2 VIF values between meteorological factors

大气污染物	风速	温度	相对湿度
$\text{PM}_{2.5}$	1.051	1.203	1.155
SO_2	1.352	2.171	1.031

将 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 不同滞后天数、不同时间步长的数据分别带入模型后,得出模型的 AIC 值 (表 3)。由模型 AIC 值可知,随着滞后天数的增加模型 AIC 值增加,且日均数据明显优于周均数据。因此,本研究最终选取当天的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 日均数据作为城市污染本底值,并作为混杂因素带入模型。同时,将季节、月份等变化也作为混杂因素带入模型,分别构建 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 对温度、风速、相对湿度的响应关系,详见图 1。

根据图 1 所构建的气象因子与大气污染物浓度间的响应关系,通过哑变量对数据进行分类,计

算各类气象因子在不同阈值区间内变化时所引起的大气污染物浓度的改变百分率(表 4)。

表 4 气象因子对大气污染物浓度的定量影响

Table 4 Quantitative effects of meteorological factors on the concentrations of air pollutants

响应变量	解释变量	阈值区间	ΔX	RR	95%CI	ER/%	95%CI
PM _{2.5}	风速	<1 m/s	0.5 m/s	0.923 6	0.852 5~1.000 6	-7.63	-14.7~-0.06
		1~3 m/s		1.009 5	0.993 6~1.025 7	0.95	-0.63~2.57
		3~4 m/s		0.950 2	0.911 8~0.990 2	-4.97	-8.81~-0.97
		4~6 m/s		1.024 0	0.979 2~1.070 8	2.40	-2.07~7.08
	相对湿度	<18%	1%	0.980 2	0.962 4~0.998 3	-1.97	-3.75~-0.16
		18%~85%		1.004 6	1.003 6~1.005 5	0.46	0.36~0.55
		>85%		0.980 0	0.962 7~0.997 6	-1.99	-3.72~-0.23
	温度	≤10 ℃	1 ℃	0.994 1	0.990 2~0.998 4	-0.56	-0.97~-0.15
>10 ℃	1.006 0	1.001 0~1.011 0		0.60	0.10~1.10		
SO ₂	风速	>0	1 m/s	1.009 1	1.003 1~1.015 1	0.91	0.31~1.51
	相对湿度	>0	1%	0.990 1	0.989 6~0.990 6	-0.98	-1.03~-0.93
	温度	>-15 ℃	1 ℃	1.004 3	1.002 9~1.005 7	0.43	0.29~0.57

结合图 1 与表 4 所计算的定量关系可知,当响应变量为 $\text{PM}_{2.5}$ 时,随风速的增加 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈波浪式变化,并非简单的风速大 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低、风速低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高。当风速在小于 1 m/s 和 3~4 m/s 区间变化时,风速的增加对 $\text{PM}_{2.5}$ 呈净化作用,且风速每增加 0.5 m/s, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大改变量为减小 7.36%。当风速在 2~3 m/s 或 3~6 m/s 之间变化时,风速越高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高,相对改变量最高为 2.49%。风速在 4~6 m/s 区间内升高导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高的原因可能为过高的风速将地表浮沉吹起,从而导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高。当风速大于 6 m/s 时,对应置信区间过大,其模型结果可信度较低,故不做定量计算。

温度对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响也存在明显的阈值效应,阈值在 10 $^{\circ}\text{C}$ 左右,使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随温度的增加先减小后增加。在温度低于约 10 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随温度每升高一个单位变化量的相对改变量为 -0.56%,当温度高于 10 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随温度每升高一个单位变化量的相对改变量为 0.6%。其中在小于 10 $^{\circ}\text{C}$ 阈值范围内温度越低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高的原因可能是冬季取暖造成的。

在相对干燥的天气条件下(相对湿度<18%)或降雨时(相对湿度>85%),相对湿度的增加多对 $\text{PM}_{2.5}$ 的净化起到积极作用,且相对湿度每增加一个单位的变化量 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相对改变量为 -1.97% 与 -1.99%。而在 18%~85% 区间内,相对

湿度的增加多引起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的升高,对应改变量为 0.46%。

当响应变量为 SO_2 时,三类气象因子的影响效应相对简单,当解释变量为风速或温度时, SO_2 浓度随解释变量的增加而增加,呈正相关关系。风速与温度增加一个 ΔX , SO_2 浓度相对改变量分别为 0.91% 与 0.43%。当解释变量为相对湿度时, SO_2 随相对湿度的增加而降低,呈负相关关系,对应改变量为 -0.98%。

3 结 论

本研究通过广义可加模型,在考虑城市大气污染排放、月份变化等混杂因素的情况下,对大气污染物与气象因子建立响应关系。在引入 RR 值的概念后,通过定量计算,定量分析了鞍山市气象因子(风速、温度、相对湿度)对 $\text{PM}_{2.5}$ 与 SO_2 两种大气污染物的影响。最终得出以下结论:

(1) 风速、温度、相对湿度三类气象因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响均存在阈值效应。解释变量为风速时,随着风速的增加 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈先减小—再增加—再减小—再增加的波浪式变化,阈值分布在 1、3、4、6 m/s;解释变量为温度时,使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随温度的升高先增加后减小,阈值在 10 $^{\circ}\text{C}$ 左右;解释变量为相对湿度时,在干燥条件下或降雨时, $\text{PM}_{2.5}$ 随相对湿度的增加而降低,阈值分布在 18%、85%。

(2)风速在 0~1 m/s 与 3~4 m/s 区间时对 $PM_{2.5}$ 的净化起到积极作用,且风速在 0~1 m/s 区间内对 $PM_{2.5}$ 的净化效果最强,风速每升高 0.5 m/s, $PM_{2.5}$ 浓度的相对改变量为-7.63%。相对湿度则在大于 85%时对 $PM_{2.5}$ 的净化效果最强,相对湿度每增加 1% 对应 $PM_{2.5}$ 浓度的相对改变量为-1.99%。当温度低于 10 ℃ 时,温度的增加对 $PM_{2.5}$ 的净化起到积极作用,温度每增加 1 ℃, $PM_{2.5}$ 浓度的相对改变量为-0.56%。

(3)三类气象因子的变化对 SO_2 浓度的影响没有明显的阈值效应, SO_2 浓度与温度、风速呈正相关,与相对湿度呈负相关。即在高温大风天气条件下,城市越易发生 SO_2 类型污染,或在干燥条件下,城市越易发生 SO_2 类型污染。相对来说,低风低温及高湿天气条件对 SO_2 的净化起到积极作用。风速、温度、相对湿度三类气象因子每发生单位减小量对应 SO_2 浓度的相对改变量分别为-0.91%、-0.43%和 0.98%。

参考文献

- [1] 王琼琼. 浅析气象因素与大气污染之间的关系 [J]. 资源节约与环保, 2020 (1): 105.
- [2] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 等. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析 [J]. 地理学报, 2021, 76 (11): 2814-2829.
- [3] 牟毫. 气象环境影响分析在城市总体规划中的运用——以《鞍山市城市总体规划 (2013-2020)》为例 [C] // 中国城市规划学会. 城乡治理与规划改革——2014 中国城市规划年会论文集 (09 城市总体规划). 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 586-593.
- [4] 徐丽娜, 李忠, 胡亚男, 等. 2019 年冬季呼和浩特市大气污染频发的气象条件分析 [J]. 干旱气象, 2021, 39 (1): 112-118.
- [5] 杨佳星, 蔡德所, 姚文婷, 等. 基于 GAM 模型的硅藻群落与环境因子相关性分析 [J]. 人民长江, 2020, 51 (6): 43-48.
- [6] 袁伟皓, 王华, 夏玉宝, 等. 基于 GAM 模型的鄱阳湖叶绿素 a 与水质因子相关性分析 [J]. 生态环境学报, 2021, 30 (8): 1716-1723.
- [7] 李娟. 基于 GAM 模型大气污染及气象因素的健康效应研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016: 65.
- [8] 马金, 黄金玲, 陈锦辉, 等. 基于 GAM 的长江口鱼类资源时空分布及影响因素 [J]. 水产学报, 2020, 44 (6): 936-946.
- [9] 曲晓黎, 刘华悦, 齐宇超, 等. 河北省高速公路交通事故与气象条件定量关系研究 [J]. 干旱气象, 2020, 38 (1): 169-175.
- [10] 马金, 黄金玲, 陈锦辉, 等. 基于 GAM 的长江口鱼类资源时空分布及影响因素 [J]. 水产学报, 2020, 44 (6): 936-946.
- [11] 李莉莉, 张璇, 杜梅慧. 基于广义可加模型的 $PM_{2.5}$ 预测研究 [J]. 数理统计与管理, 2020, 39 (5): 811-823.
- [12] 张云权, 朱耀辉, 李存禄, 等. 广义相加模型在 R 软件中的实现 [J]. 中国卫生统计, 2015, 32 (6): 1073-1075.
- [13] Wood S N, Augustin N H. GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling [J]. Ecological Modeling, 2002, 157 (2-3): 157-177.
- [14] 祝熙, 黄正勇, 贺磊. 影响环境空气质量的 $PM_{2.5}$ 与相关因素的关系研究 [J]. 安庆师范学院学报 (自然科学版), 2015, 21 (1): 31-35.
- [15] 贾小花, 解静芳, 马翔, 等. 太原市冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性组分污染特征分析 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (4): 599-604.
- [16] 乐满, 王式功, 谢佳君, 等. 环境条件对遵义市呼吸系统疾病的影响及预测研究 [J]. 中国环境科学, 2018, 38 (11): 4334-4347.