

武汉地区气象数据对新型冠状病毒肺炎疫情影响的分析

刘颖 张晓蕊 刘光子 曹雪娇 李雪丽

摘要

湖北省武汉市在 2019 年底爆发新型冠状病毒肺炎 (COVID-19)，对人们的生活和工作产生很大影响，截至 2020 年 3 月 31 日，武汉市累计确诊 50007 人，累计死亡 2553 人。传染病学家已经发现 COVID-19 的主要传播途径是呼吸道飞沫和接触传播。为探讨气象因素和大气污染物对 COVID-19 的影响，本文选取了 2020 年 1 月 20 日至 2020 年 3 月 31 日的的数据，进行相关分析，并建立广义相加模型 (GAM) 和分布滞后非线性模型 (DLNM)。研究表明，气象和大气污染物对 COVID-19 确诊人数和死亡人数有一定的影响且存在滞后效应。

关键词：COVID-19；GAM 模型；DLNM 模型；相对危险度

1 引言

1.1 研究背景

2019 年 12 月，湖北省武汉市爆发新型冠状病毒肺炎 (COVID-19)。2020 年上半年，新型冠状病毒肺炎在世界范围内广泛传播，对公共卫生和世界经济产生了重大影响，引起了国内外的高度重视。

从以往经历来看，传染病的发生、传播、流行与气象条件和空气污染密切相关。特定的气象条件对呼吸道疾病有一定的诱发作用，病毒的活跃程度和扩散能力与气温、气压、湿度、风速、降水、日照等气象因素密切相关。而空气污染则会削弱人体的呼吸道，降低人体免疫力，增加对病毒的易感性。目前，COVID-19 的主要传播途径是呼吸道飞沫传播和接触传播。湿度、风速等会影响到环境中液滴的稳定性；温度则可能会影响病毒在传播路径上的活性；污染微粒为病毒提供了寄身场所，帮助病毒扩散，进而影响新冠病毒的传播。

因此，本研究基于武汉市的气象数据、空气污染数据与疫情数据，探索气象因素、大气污染物与 COVID-19 之间的关系。

1.2 文献综述

在以往的传染病相关研究中,研究气象和污染物对传染病影响的文献不在少数。劳家辉等(2018)利用 GAM 模型探讨昼夜温差与北京市老年人群流感发病数之间是否为线性关系,并利用 DLNM 模型定量评估昼夜温差对发病的滞后效应。奉琪等(2018)采用 DLNM 模型,控制时间长期趋势、气象因素、星期几及节假日效应等混杂因素,分析 PM_{2.5} 单独暴露及其与 PM₁₀、NO₂、SO₂、CO 等联合暴露时居民每日总死亡、心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡的风险。

自新冠疫情爆发以来,不少学者探索气象条件对病毒传播的影响,得出的结论也不尽相同。Bo Wang 等(2020)建立广义相加模型,分析空气颗粒物污染 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与 72 个城市的每日确诊病例之间的关系,认为 PM_{2.5}、PM₁₀ 与 COVID-19 之间存在正相关关系。Jianfeng Li 等(2020)通过相关分析和线性回归,判断湖北省气象因素与 COVID-19 确诊病例之间的关系,认为平均压力与增量呈正相关,平均温度、最低温度和平均水汽压则呈现负相关。Yueling Ma 等(2020)发现日温度范围与 COVID-19 死亡率呈正相关,而相对湿度与 COVID-19 死亡率呈负相关。Zonglin He 等(2020)采用相关分析和 GAM 模型研究每日新增 COVID-19 病例与平均气温和相对湿度之间的关系,认为气象因素不太可能对 COVID-19 疫情产生重大影响。Hongchao 等(2020)建立 GAM 模型分析中国各省的平均气温和相对湿度对 COVID-19 每日确诊病例的影响,认为各省气象因子对 COVID-19 影响不一致。

2 模型介绍

2.1 广义相加模型

在流行病学和统计学的应用中,一般使用回归模型探索响应变量和解释变量的线性关系,其中一般线性模型最基础,其严格的基本假设条件是:随机误差项必须服从零均值同方差的正态分布。广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)为了克服一般线性模型的缺点,对假设条件进行推广:自变量可以适用于连续数据和离散数据,因变量可以是非连续性;随机误差不一定服从正态分布,可以服从指数分布族(如正态分布、Poisson 分布、二项分布等);通过连接函数(Link Function)建立响应变量和解释变量之间的数学关系。相比于 GLM,由 Hastie 和 Tibshirani 于 1986 年首次提出的广义相加模型(Generalized Additive Model, GAM)适用范围更广,适用于多种分布类型,多种复杂的非线性关系的分析。GAM 对 GLM 进一步推广条件如下:自变量与因变量可以为已知或未知关系;引入半参数或非参数回归方法建立模型,即模型中的解释成分可以是解释变量本身,也可以是解释变量的基函数形式,其中基函数的形式主要包括非参数平滑函数(如局部移动平均、

样条平滑函数)、多项式函数(如自然立方样条函数、B 样条函数及其他多项式函数)等。在 R 中,有三个程序包可以拟合广义相加模型,分别 Trevor Hastie 和 Tibshirani 编写的是 gam 程序包,Simon Wood 编写的 mgcv 程序包和 Chong gu 编写的 gcc 程序包。

广义相加模型的一般形式为:

$$\log[E(Y_t)] = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{j=1}^m f_j(Z_j)$$

式中, Y_t 为观察日 t 日的确诊人数或死亡人数; $E(Y_t)$ 为观察日 t 日的确诊人数或死亡人数的期望值; X_i 为对因变量产生线性影响的自变量; β_i 为回归模型估计的解释变量系数; $f_j(Z_j)$ 为样条函数; Z_j 为对因变量产生非线性影响的变量。

2.2 分布滞后非线性模型

空气污染、气象等暴露因素的健康效应均有一定的持续性和滞后性。换言之,人群健康指标(如死亡率、发病率)不仅与当天的暴露水平有关,还可能受昨天乃至十多天前暴露的影响。近年来,分布滞后线性模型的提出使得该问题的研究有了很大的进展,国外目前普遍运用该法研究空气污染的健康效应,但该法的应用前提是暴露-反应关系呈线性。然而,现实研究中有的暴露-反应关系呈现非线性,如气温效应通常呈 U 型、V 型或 J 型分布,并不适合使用该法。分布滞后非线性模型(Distributed Lag Non-Linear Model, DLNM)同时考虑暴露因素的滞后效应(lag effect)和暴露-反应的非线性关系。

该模型首先建立基于传统方法的基本模型,可为广义线性模型、广义相加模型以及广义估计方程等;接着对暴露-反应和滞后效应在时间维度的分布给予某些限制,从而估计不同滞后时间的暴露-反应关系,它的核心思想是构建交叉基(cross-basis),对自变量与因变量的关系、滞后效应的分布分别选择合适的基函数,求两个基函数的张力积即得交叉基函数。在 R 中,可以使用 Antonio Gasparrini、Ben Armstrong 和 Fabian Scheipl 编写的 dlnm 程序包来构建 DLNM 模型。

为了定量研究大气污染物或气温因素对健康效应的影响,需要对危险度进行评估。根据 GAM 模型估计的暴露-反应回归系数,计算相对危险度(relative risk, RR):

$$RR = e^{\beta * IQR}$$

式中: IQR 为四分位距, $IQR = \text{第三四分位数 } Q_3 - \text{第一四分位数 } Q_1$ 。

然后计算 RR 的 95% 置信区间(95%CI):

$$95\%CI = [e^{(\beta - 1.96Se) * IQR}, e^{(\beta + 1.96Se) * IQR}]$$

式中: Se 为标准误。

3 描述性统计分析

3.1 数据说明

疫情数据来源于湖北省卫生健康委员会, 选取武汉市每日新增确诊病例数和每日新增死亡病例数。气象数据来源于中国气象数据网, 选取武汉市每日平均气温、平均相对湿度、日照时数、日温度范围和平均风速数据。空气污染数据来源于中国空气质量在线监测分析平台, 选取武汉市 PM2.5、PM10、SO₂、CO、NO₂ 和 O₃ 数据。所选数据样本的时间跨度均为 2020 年 1 月 20 日至 3 月 31 日。所选变量的描述统计结果如表 1 所示:

表 1 变量描述统计表

变量名	平均值	标准差	最小值	最大值
当日新增确诊数	704.47	1694.75	0	13436
当日新增死亡数	36.90	39.40	1	216
平均气温	9.84	4.87	1.8	20.6
日温度范围	9.42	4.93	1.5	18.3
平均相对湿度	80.78	8.03	59	97
日照时数	6.24	3.49	0	10.7
平均风速	1.54	1.02	0.3	5.3
PM2.5	40.28	20.57	8	97
PM10	52.90	24.84	12	116
SO ₂	8.01	2.81	5	17
CO	0.93	0.21	0.5	1.4
NO ₂	22.38	9.45	10	76
O ₃	80.83	24.37	39	136
星期几效应	0.28	0.45	0	1

3.2 武汉各区疫情情况

由于对武汉市各区 COVID-19 确诊人数的统计数据在 2020 年 2 月 21 日才开始发布, 因此我们选取 2 月 21 日至 3 月 31 日的各区累计确诊人数数据来观察武汉市各区的疫情变化情况。由图 1 可以看到, 自 3 月 5 日起大疫情网的统计口径由“按行政区统计”转变为“按现住址统计”, 5 日前后武汉各区累计确诊病例的增减变化较大, 且新增了东湖开发区和东湖风景区两个区的统计数据。以其为分界点, 各区累计确诊病例数在 2 月 21 日-3 月 5 日之间不断上升, 在 3 月 5 日后趋于平缓。

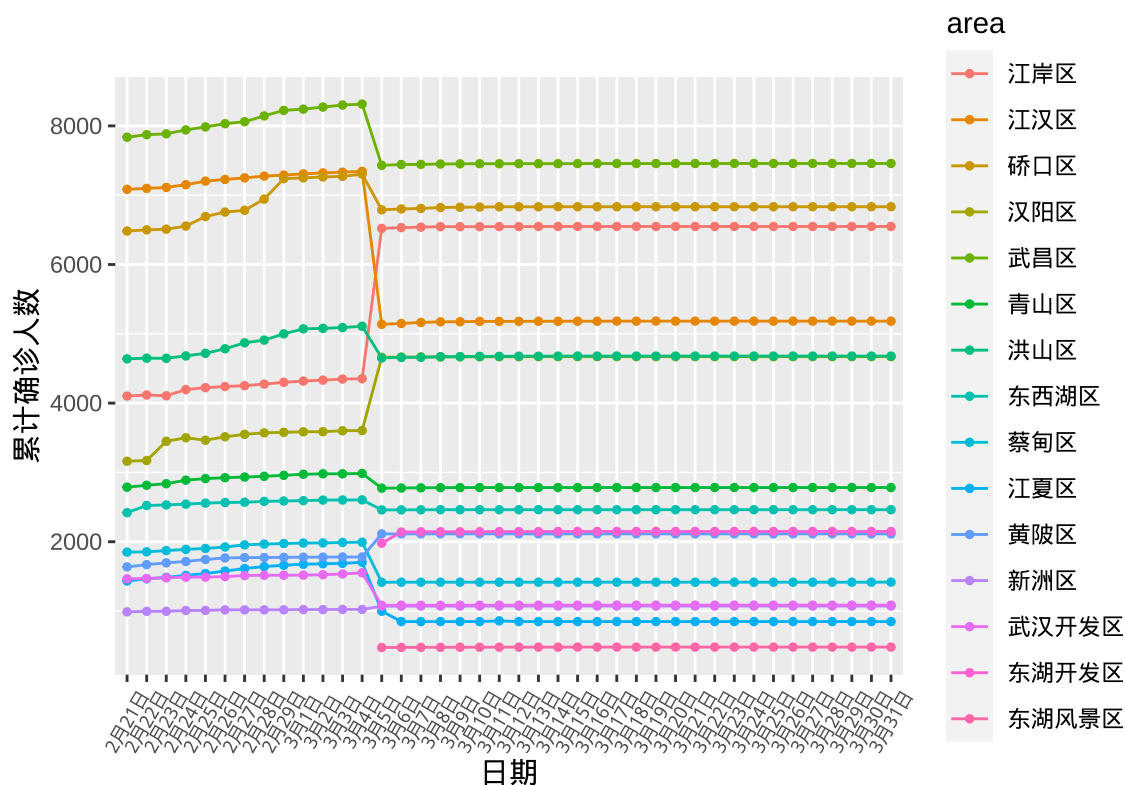


图 1: 武汉各区累计确诊人数变化折线图

选取 3 月 31 日各区 COVID-19 累计确诊人数做占比环形图，观察疫情在武汉各区的严重程度。由图 2 可知，武昌区、江岸区、硚口区的疫情较为严重，东湖风景区、江夏区、新洲区、武汉开发区的确诊人数相对较少。对照地图可知，武汉市疫情由中心城区向远城区呈发散状分布。

4 实证分析

4.1 相关分析

相关分析是一种简单易行的测量定量数据之间的关系情况的分析方法，可分析包括变量间的关系情况以及关系强弱程度等。常见的相关系数有三类：Pearson 相关系数、Spearman 相关系数和 Kendall 相关系数。本文通过对气象和空气污染数据与新冠肺炎当日新增确诊数和当日新增死亡数之间的相关性分析，希望得出气象指标和空气污染指标与新冠肺炎之间的关系。由于传染病致病具有一定的滞后效应，本文将在相关分析时引入滞后期。

由表 2 可知，在研究气象、空气污染指标对不同滞后期当日新增确诊数的相关性之后发现，相关系数显著的指标有 $SO_2(0)$ 、 $CO(1)$ 、 $O_3(1)$ 、 $AT(0)$ 、 $RH(6)$ 、 $DTR(3)$ ，括号中表

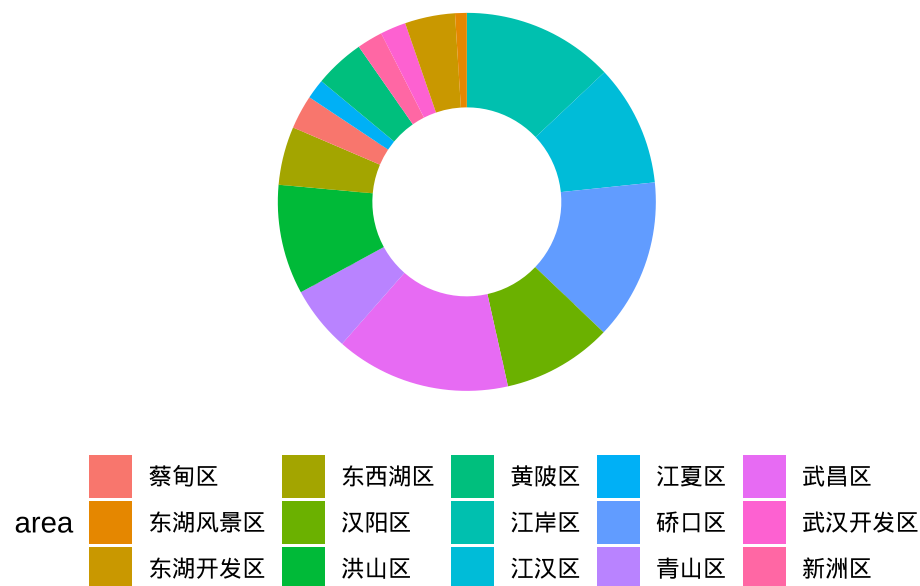


图 2: 武汉各区累计确诊人数占比环形图

示该指标与当日新增确诊数相关性系数达到显著的滞后期，证明指标 SO₂、CO、O₃、AT、RH、DTR 与当日新增确诊数之间存在相关关系，且指标 RH 与当日新增确诊数为正相关，指标 SO₂、CO、O₃、AT、DTR 与与当日新增确诊数为负相关。

表 2 气象、空气污染指标与当日新增确诊数相关性系数与显著性水平汇总表

滞后期	0	1	2	3	4	5	6	7
PM2.5	0.00 (0.97)	0.04 (0.74)	0.08 (0.52)	0.08 (0.51)	0.13 (0.29)	0.10 (0.42)	0.11 (0.40)	0.14 (0.28)
PM10	-0.20 (0.10)	-0.18 (0.14)	-0.18 (0.14)	-0.19 (0.12)	-0.16 (0.20)	-0.22 (0.08)	-0.21 (0.10)	-0.18 (0.15)
SO2	-0.23 (0.05)	-0.33 (0.01)	-0.33 (0.01)	-0.35 (0.00)	-0.34 (0.010)	-0.39 (0.00)	-0.38 (0.00)	-0.41 (0.00)
CO	-0.13 (0.29)	-0.24 (0.04)	-0.25 (0.04)	-0.30 (0.01)	-0.27 (0.03)	-0.42 (0.00)	-0.43 (0.00)	-0.42 (0.00)
NO2	-0.09 (0.47)	-0.12 (0.32)	-0.11 (0.37)	-0.12 (0.34)	-0.06 (0.65)	-0.07 (0.58)	-0.07 (0.57)	-0.09 (0.50)
O3	-0.19 (0.12)	-0.23 (0.06)	-0.29 (0.02)	-0.28 (0.02)	-0.27 (0.03)	-0.30 (0.01)	-0.32 (0.01)	-0.37 (0.00)
AT	-0.54	-0.60	-0.60	-0.62	-0.64	-0.69	-0.75	-0.79

滞后期	0	1	2	3	4	5	6	7
	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
SUN	0.10	0.00	-0.04	-0.07	-0.06	-0.09	-0.08	-0.12
	(0.43)	(0.98)	(0.74)	(0.58)	(0.63)	(0.48)	(0.51)	(0.35)
RH	0.11	0.14	0.15	0.20	0.21	0.21	0.26	0.30
	(0.35)	(0.24)	(0.21)	(0.10)	(0.09)	(0.09)	(0.04)	(0.02)
DTR	-0.09	-0.18	-0.23	-0.25	-0.24	-0.29	-0.31	-0.32
	(0.45)	(0.14)	(0.06)	(0.04)	(0.05)	(0.02)	(0.01)	(0.01)
WIND	-0.21	-0.16	-0.12	-0.08	-0.09	-0.09	-0.07	-0.05
	(0.08)	(0.18)	(0.33)	(0.53)	(0.48)	(0.47)	(0.61)	(0.69)

由表 3 可知, 在研究气象、空气污染指标对不同滞后期当日新增死亡数的相关性之后发现, 相关系数显著的指标有 PM2.5(0)、SO2(2)、CO(2)、O3(4)、AT(0)、RH(6)、SUN(6), 括号中表示该指标与当日新增确诊数相关性系数达到显著的后期, 证明指标 PM2.5、SO2、CO、O3、AT、RH、SUN 与当日新增死亡数之间存在相关关系, 且指标 RH 与当日新增死亡数为正相关, 指标 PM2.5、SO2、CO、O3、AT、SUN 与与当日新增确诊数为负相关。

表 3 气象、空气污染指标与当日新增死亡数相关性系数与显著性水平汇总表

滞后期	0	1	2	3	4	5	6	7
PM2.5	-0.13	-0.07	-0.08	-0.10	-0.10	-0.16	-0.12	-0.07
	(0.02)	(0.02)	(0.01)	(0.01)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.01)
PM10	-0.27	-0.27	-0.30	-0.34	-0.38	-0.41	-0.39	-0.34
	(0.27)	(0.54)	(0.51)	(0.42)	(0.42)	(0.21)	(0.35)	(0.59)
SO2	-0.12	-0.19	-0.25	-0.32	-0.35	-0.42	-0.45	-0.46
	(0.31)	(0.11)	(0.04)	(0.01)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
CO	-0.14	-0.21	-0.28	-0.36	-0.40	-0.48	-0.43	-0.41
	(0.25)	(0.08)	(0.02)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
NO2	-0.13	-0.14	-0.13	-0.16	-0.19	-0.21	-0.24	-0.20
	(0.28)	(0.26)	(0.31)	(0.18)	(0.13)	(0.09)	(0.06)	(0.12)
O3	-0.04	-0.11	-0.17	-0.18	-0.29	-0.30	-0.37	0.42
	(0.75)	(0.35)	(0.16)	(0.14)	(0.02)	(0.01)	(0.00)	(0.00)
AT	-0.29	-0.41	-0.50	-0.59	-0.64	-0.68	-0.68	-0.68
	(0.01)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
DTR	0.15	0.10	0.07	0.07	-0.04	-0.03	-0.10	-0.14

滞后期	0	1	2	3	4	5	6	7
	(0.21)	(0.41)	(0.60)	(0.60)	(0.78)	(0.80)	(0.43)	(0.27)
RH	-0.04	-0.02	0.00	0.10	0.12	0.20	0.28	0.34
	(0.74)	(0.85)	(0.98)	(0.42)	(0.34)	(0.11)	(0.03)	(0.01)
SUN	0.03	-0.05	-0.06	-0.07	-0.18	-0.23	-0.32	-0.34
	(0.81)	(0.67)	(0.63)	(0.58)	(0.16)	(0.07)	(0.01)	(0.01)
WIND	-0.19	-0.17	-0.20	-0.19	-0.11	-0.08	-0.01	0.03
	(0.12)	(0.17)	(0.09)	(0.12)	(0.38)	(0.53)	(0.94)	(0.81)

4.2 气象因素对确诊人数的影响分析

由于本次研究中的样本数量较少，变量较多，并结合气象和污染物变量对武汉市当日新增确诊人数的相关性，选取平均温度等六个变量进入模型。

图 3 为气象因素与确诊人数的暴露-反应关系图。武汉市新冠肺炎当日新增确诊人数随着时间的推移大致呈现先波动变化后下降的趋势；平均温度（AT）对确诊人数的影响呈现先上升后下降的趋势，当 $AT < 10^{\circ}\text{C}$ 时，确诊人数随温度的升高而增加，当 $AT > 10^{\circ}\text{C}$ 时，确诊人数随温度的升高而减少；日温度范围（DTR）和平均相对湿度（RH）对确诊人数的影响基本在 0 附近呈现一条直线，说明日温度范围和平均相对湿度的变化不会对确诊人数产生明显的影响。

图 4 为不同滞后期的气象因素对武汉市当日新增确诊人数影响的 RR 值及 95% CI 。平均温度（AT）在滞后 0, 1, 2, 4, 5 和 7 天时，会增加新冠肺炎患者的发病风险，并且在滞后 7 天时的影响效应最大，相对危险度是 18.101。日温度范围（DTR）在滞后 2, 3, 5 和 6 天时，会增加新冠肺炎患者的发病风险，并且在滞后 5 天时的影响效应最大，相对危险度是 4.811。平均相对湿度（RH）在滞后 1, 2, 3, 5 和 7 天时，会增加新冠肺炎患者的发病风险，并且在滞后 5 天时的影响效应最大，相对危险度是 3.576。

图 5 为不同滞后期的空气污染物对武汉市当日新增确诊人数影响的 RR 值及 95% CI 。PM2.5 在滞后 2-5 天和滞后 7 天时，会增加新冠肺炎患者的发病风险，并且在滞后 3 天时对确诊人数的影响效应最大，相对危险度是 1.246。SO₂ 在滞后 0-6 天时，会增加新冠肺炎患者的发病风险，并且在滞后 2 天时的影响效应最大，相对危险度是 10.877。O₃ 在滞后 0, 1 和 7 天时，会增加新冠肺炎患者的发病风险，并且在滞后 1 天时的影响效应最大，相对危险度是 1.069。

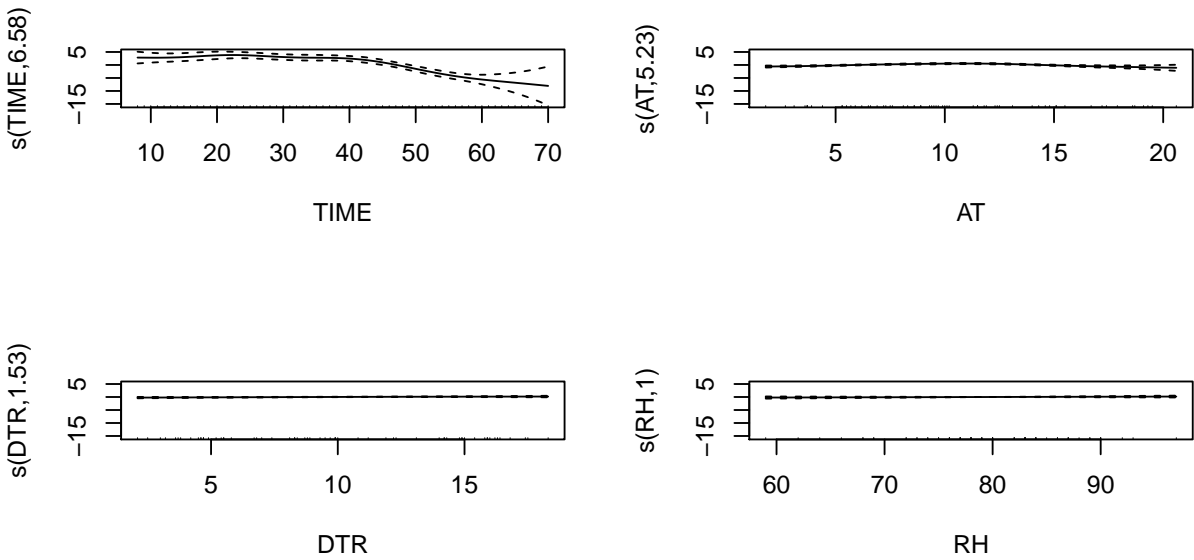


图 3: 气象因素与确诊人数的暴露-反应关系图

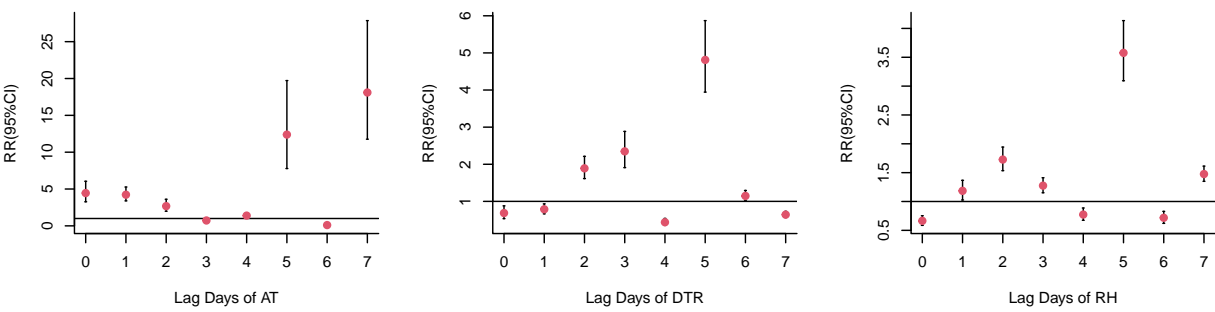


图 4: 气象因素对确诊人数影响的 RR 值及 $95\%CI$

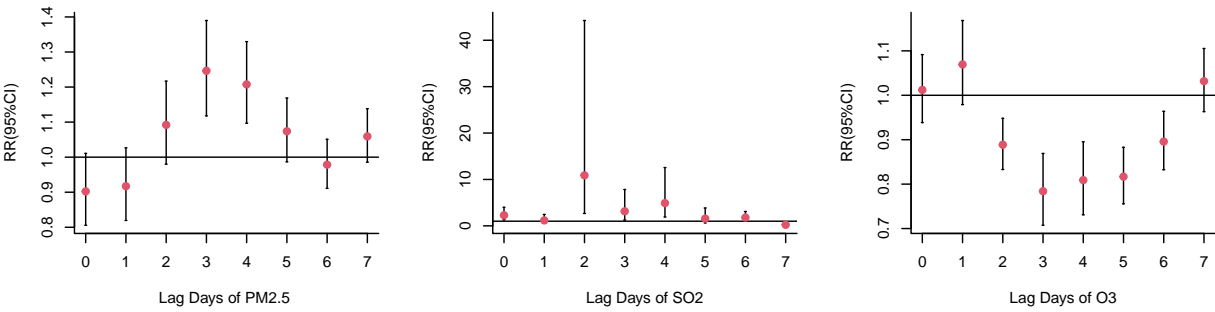


图 5: 空气污染物对确诊人数影响的 RR 及 $95\%CI$

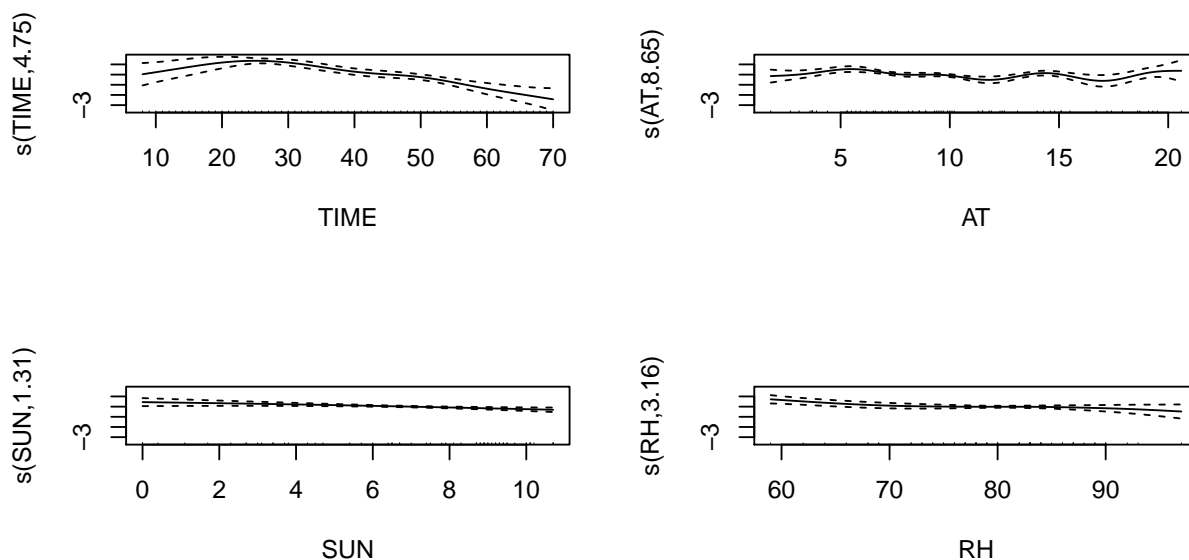


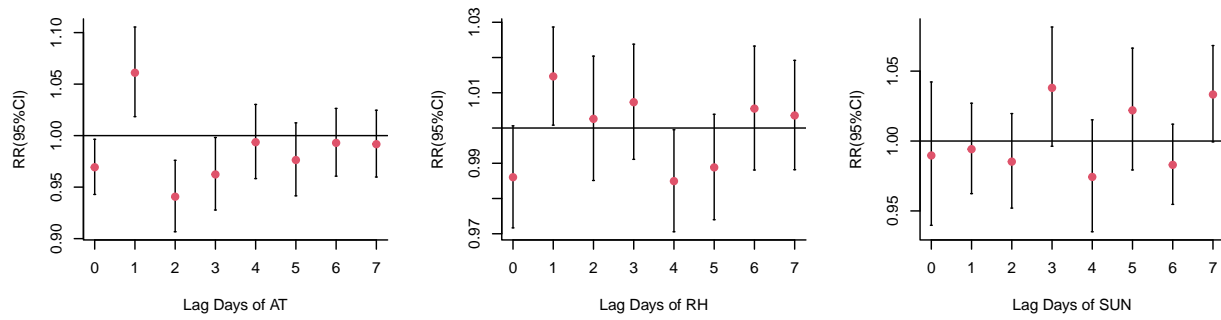
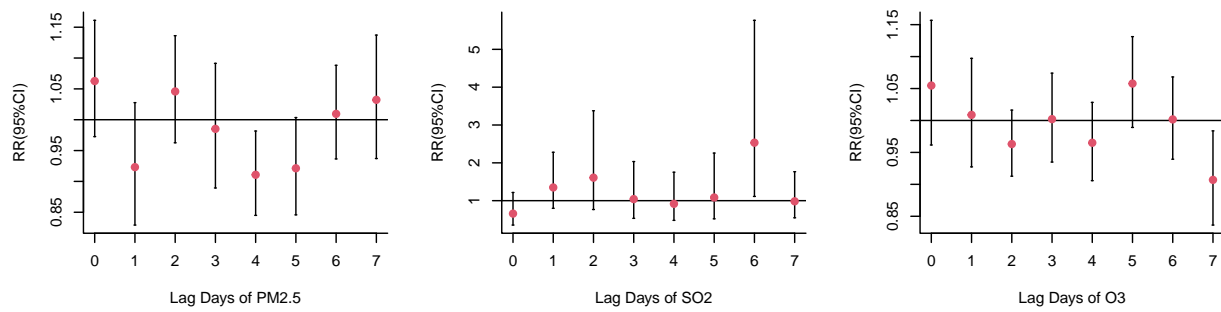
图 6: 气象因素与死亡人数的暴露-反应关系图

4.3 气象因素对死亡人数的影响分析

图 6 为气象因素与死亡人数的暴露-反应关系图。死亡人数随时间变化的趋势成倒“V”型，前 25 天呈现上升趋势，之后呈现下降趋势；平均温度（AT）对死亡人数的影响呈现上下波动的趋势，波动趋势相对比较平缓；日照时数（SUN）对新冠肺炎的影响呈现下降的趋势，日照时间越长，死亡人数下降；平均相对湿度（RH）对死亡的影响基本也是呈现下降的趋势，随着湿度的增加，死亡人数下降。

图 7 为不同滞后期的气象因素对武汉市当日新增死亡人数影响的 RR 值及 95% CI 。平均温度（AT）在滞后 1 天时，会增加新冠肺炎患者的死亡风险，相对危险度是 1.194。平均相对湿度（RH）在滞后 1, 2, 3, 6 和 7 天时，会增加新冠肺炎患者的死亡风险，并且在滞后 1 天时的影响效应最大，相对危险度是 1.053。日照时长（SUN）在滞后 3, 5 和 7 天得时候会增加新冠肺炎患者的死亡风险，并且在滞后 3 天时的影响效应最大，相对危险度是 1.747。

图 8 为不同滞后期的空气污染物对武汉市当日新增死亡人数影响的 RR 值及 95% CI 。PM2.5 在滞后 0, 2, 6 天和 7 天时，会增加新冠肺炎患者的死亡风险，并且无滞后时的影响效应最大，相对危险度为 1.063。SO₂ 在滞后 1, 2, 5, 6 天时，会增加新冠肺炎患者的死亡风险，并且在滞后 6 天时的影响效应最大，相对危险度为 2.533。O₃ 在滞后 0, 5, 6 和 7 天时，会增加新冠肺炎患者的死亡风险，并且在滞后 5 天时的影响效应最大，相对危险度为 1.057。

图 7: 气象因素对死亡人数影响的 RR 及 $95\%CI$ 图 8: 空气污染物对死亡人数影响的 RR 及 $95\%CI$

5 结论

相关分析结果表明, SO_2 、 CO 、 O_3 、平均温度、相对湿度、日温度范围与当日新增确诊人数之间存在相关关系; $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 CO 、 O_3 、平均温度、相对湿度、日照时数与当日新增死亡数之间存在相关关系。

气象滞后与污染滞后对武汉市新冠肺炎的当日新增确诊人数与当日新增死亡人数的影响都不同。平均温度滞后 7 天、日温度范围滞后 5 天以及平均相对湿度滞后 5 天对确诊人数的影响最大; 平均温度滞后 1 天、日照时数滞后 3 天以及平均相对湿度滞后 1 天对死亡人数的影响最大。 $\text{PM}_{2.5}$ 滞后 3 天、 SO_2 滞后 2 天以及 O_3 滞后 1 天对确认人数的影响最大; $\text{PM}_{2.5}$ 无滞后、 SO_2 滞后 6 天以及 O_3 滞后 5 天对死亡人数的影响最大。

6 致谢

时间如白驹过隙, 近四个月的学习生活转瞬即逝。首先感谢闫军教授给予我们很多的指导, 使我们的专业知识和科研能力得到了质的提升, 同时闫军教授严谨的治学态度及渊博的学识都让我们备受熏陶; 其次, 感谢同学们所提的问题和建议, 使得我们不断完善自己的论文, 另外, 我们也从大家做的报告中学习到很多新的知识, 这将是我们的宝贵财富。

贡献声明

(1) 刘颖: 负责第四部分中的相关分析, 得出各指标与当日新增确诊数和当日新增死亡数的相关关系。

(2) 张晓蕊: 负责第四部分中气象因素对确诊人数的影响分析, 以及查找部分数据和编写部分实证代码。

(3) 刘光子: 负责第一部分引言, 包括研究背景和文献综述, 以及第三部分描述性统计。

(4) 曹雪娇: 负责第二部分 GAM 模型及 DLNM 模型的介绍, 同时编写了部分实证代码。

(5) 李雪丽: 负责第四部分中气象因素对死亡人数的影响分析, 总结全文并得出结论。

参考文献

[1] 劳家辉, 刘志东, 刘言玉, 张静, 姜宝法. 昼夜温差对老年人群流感的影响及亚组分析[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 11(39):1454-1458.

[2] 奉琪, 苏莎, 张劲夫, 朱彩明. 长沙市城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与居民每日死亡关系研究[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(2):131-136.

[3]Bo Wang, Jiangtao Liu, Shihua Fu, et al. An effect assessment of Airborne particulate matter pollution on COVID-19: A multi-city Study in China [J]. medRxiv, 2020.

[4]Jianfeng Li, Linyuan Zhang, Zhihua Ren, et al. Meteorological factors correlate with transmission of 2019-nCoV: Proof of incidence of novel coronavirus pneumonia in Hubei Province, China [J]. medRxiv, 2020.

[5]Yueling Ma, Yadong Zhao, Jiangtao Liu, et al. Effects of temperature variation and humidity on the mortality of COVID-19 in Wuhan [J]. medRxiv, 2020.

[6]Zonglin He, Yiqiao Chin, Jian Huang, et al. Meteorological factors and domestic new cases of coronavirus disease (COVID-19) in nine Asian cities: A time-series analysis [J]. medRxiv, 2020.

[7]Hongchao, Shuang Xiao, Runye Shi, et al. COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: a time-series analysis [J]. Science of The Total Environment, 2020(728).