



# 气候因素与控制措施对 COVID-19 疫情传播的影响

闫琴玲<sup>1</sup>, 刘培宇<sup>2</sup>

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西师范大学 数学与统计学院, 陕西 西安 710119)

**摘 要:** COVID-19 疫情的暴发对医疗机构、社会和经济带来了前所未有的挑战, 因此有必要了解影响该疾病传播的潜在因素。首先, 采用统计描述获取 COVID-19 日新增病例数和气候因素的时空分布特征。然后, 基于纵向数据的 Poisson 回归模型和广义估计方程 (GEE), 研究了 COVID-19 病例数与气候因素、控制措施和人口密度之间的关系。结果表明, 影响 COVID-19 疫情的因素是多方面的, 控制措施对 COVID-19 疫情的影响最为显著, 其次是平均温度、平均相对湿度、平均露点、气候因素的长期趋势和季节变化。在不同的时滞水平下, 平均温度与平均相对湿度、平均温度与平均风速、平均温度与平均大气压强之间的交互作用具有统计显著性, 这进一步说明, 多种因素的相互作用引起 COVID-19 疫情的暴发。研究结果可为疫情防控部门制定有效的、强有力的管控措施提供一定的依据。

**关 键 词:** COVID-19; 气候因素; 控制措施; Poisson 回归模型; 广义估计方程 (GEE)

**中图分类号:** O 29

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1008-9497(2023)02-144-09

YAN Qinling<sup>1</sup>, LIU Peiyu<sup>2</sup> (1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Mathematics and Statistics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Impact of meteorological factors and control measures on the spread of COVID-19 epidemic.** Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2023, 50(2):144-152

**Abstract:** As COVID-19 outbreak poses an unprecedented challenge for healthcare organizations, societies and economies, there is an increasing necessity to understand the factors underlying the spread of the disease. The statistical descriptions are employed to address spatial-temporal distribution characteristic of the COVID-19 cases and meteorological factors. Further, ten candidate Poisson regression models were formulated to explore the relationship among COVID-19 cases and meteorological factors, control measures and population density by generalized estimating equation (GEE) based on longitudinal data. The main results revealed that the impact factors for the COVID-19 prevalence are manifold, and control measures have the most significant impact on COVID-19 prevalence, followed by the effect of average temperature, average relative humidity, average dew point, long-term trend and seasonal changes of meteorological factors. And also, the interaction effects between average temperature and average relative humidity, average temperature and average wind speed, average temperature and average pressure are statistically significant at the different lag level. This further shows that the interaction of multiple factors could result in COVID-19 outbreak, and thus providing some bases for the epidemic prevention and control departments to enact effective and powerful management measures.

**Key Words:** COVID-19; meteorological factors; control measures; Poisson regression model; generalized estimating equation (GEE)

**收稿日期:** 2021-10-05.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(12001058); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2021JQ-215); 陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20210511).

**作者简介:** 闫琴玲(1988—), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0927-9197>, 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事生物统计、生物数学研究, E-mail: [yanqinling1222@chd.edu.cn](mailto:yanqinling1222@chd.edu.cn).

## 0 引言

COVID-19疫情对全球医疗机构和经济体带来了前所未有的挑战。截至2021年10月1日,在全球220多个国家和地区,COVID-19疫情累计感染23 486.6万人,死亡482.1万人,且仍在蔓延。COVID-19感染人数在短时间内迅速增加,了解影响其传播的潜在因素非常必要。已有研究涉及影响COVID-19流行的因素,包括控制措施、个体行为改变、媒体报道、气候等<sup>[1-13]</sup>。然而,季节性变化、气候和控制措施是否会减缓COVID-19疫情的传播,目前尚不清楚。

基于Pearson、Kendall和Spearman秩相关法,文献[1-2]分析了全球多个国家或地区气候因素与COVID-19病例数的相关性,得到温度、露点、降水量、太阳紫外线辐射、空气质量与COVID-19疫情的变化显著相关。文献[3-5]分别将广义相加模型(GAM)应用于中国和巴西的气候数据和COVID-19病例数据,结果表明,最高温度、相对湿度、降水量和城市部分关闭干预措施对COVID-19新增病例数有显著影响。为了分析影响1 055个地区COVID-19累计病例数的多个驱动因素的重要性顺序,KUBOTA等<sup>[6]</sup>采用多元线性回归和随机森林法,探究了气候因素、人口流动性和特定区域人们的易感性(如是否接种卡介疫苗、是否感染疟疾、老年人口数)对COVID-19疫情的影响,发现人口流动性和易感性的影响大于气候因素。MECENAS等<sup>[7]</sup>基于17篇文献系统研究了气候因素与COVID-19病例数之间的关系,认为温暖潮湿的气候可能会减缓COVID-19疫情的传播。文献[9-12]通过常微分方程和神经网络模型分析了控制措施、个体行为改变和媒体报道对COVID-19疫情的影响,结果表明,在治疗费用昂贵、资源短缺的情况下,政府和个人应重点关注防控措施,从而有效控制COVID-19疫情。

上述研究只关注特定因素,并未考虑综合影响。基于此,为确定在不同气候条件下影响COVID-19疫情的关键因素,并解释不同研究得到不同结论的原因,本文着重开展了以下四方面工作:(1)搜集4个城市、16个国家的多尺度数据(COVID-19病例数、气候数据和控制措施),包括横截面和纵向数据,这无疑为数据分析、模型拟合和预测带来了挑战;(2)采用广义估计方程(generalized estimate equation, GEE)揭示影响COVID-19疫情的关键因素,并确定影响最显著的

因素;(3)讨论气候因素相互作用对COVID-19发病率的影响;(4)公共卫生部门如何预防和管控突发性传染病。

首先,基于搜集的COVID-19新增病例数、气候数据、控制措施和人口密度数据进行统计描述。然后,为探讨COVID-19新增病例数与气候因素、控制措施、人口密度的关系,建立10个候选的Poisson回归模型,利用独立模型准则下的修正拟似然(QICC)和GEE,得到最优模型和最佳拟合方程的参数估计值。最后,识别COVID-19疫情暴发的影响因素。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据来源

考虑气候条件可能对COVID-19疫情产生影响,首先,搜集10种气候条件下的10个代表性城市的气候数据,包括亚热带季风气候(中国武汉)、温带大陆性气候(美国纽约)、地中海气候(意大利米兰)、亚热带季风性湿润气候(巴西疫情最严重的地区圣保罗)、温带海洋性气候(英国伦敦)、热带季风气候(印度新德里)、热带沙漠气候(秘鲁利马)、温带季风气候(中国北京)、热带雨林气候(哥伦比亚波哥大)和热带草原气候(肯尼亚内罗比)以及相应城市或国家的COVID-19病例(武汉、纽约、米兰、巴西、英国、印度、秘鲁、北京、哥伦比亚、肯尼亚)。其次,考虑研究期间(2020年1月16日—5月12日)疫情较严重的国家,如塞尔维亚、俄罗斯、伊朗(温带大陆性气候)、西班牙、土耳其(地中海气候)、德国、法国、比利时(温带海洋气候)、泰国(热带季风气候)。最终搜集4个城市、16个国家的COVID-19病例数及20个城市的气候数据。

中国武汉、美国纽约、意大利米兰和中国北京4个城市的COVID-19每日确诊病例数据分别来自湖北省卫生健康委员会官网(<http://wjw.hubei.gov.cn/>)、纽约市卫生健康委员会官网(<https://www1.nyc.gov/site/doh/covid/covid-19-main.page>)、米兰卫生局官网(<http://www.salute.gov.it/portale/home.html>)和中华人民共和国国家卫生健康委员会官网(<http://www.nhc.gov.cn>)。英国、西班牙、法国和比利时的COVID-19病例数据来自世界卫生组织官网(<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports/>)。其他国家的COVID-19病例数据来自约翰霍普金斯大学系统科学与工程中心(CSSE)(<https://data.humdata.org/dataset/novel-coronavirus-2019-ncov-cases#data-resources-0>),这些城市和国家

的新增病例数与控制措施和人口密度的关系如图 1 (a)~(c)所示。

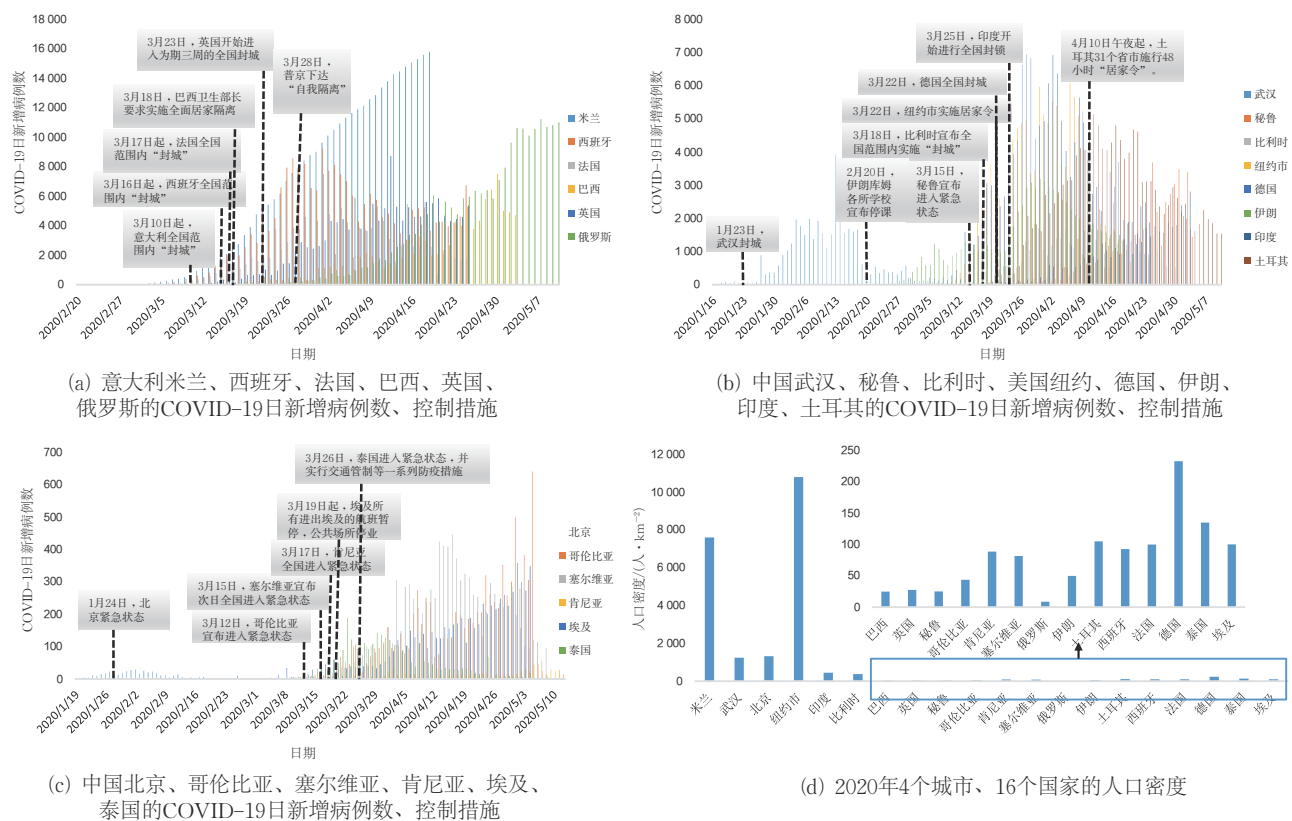


图 1 4个城市、16个国家 COVID-19 新增病例数、控制措施、人口密度  
Fig.1 The number of new hospital notifications of COVID-19, control measures, population density for 4 cities and 16 countries

中国武汉、美国纽约、意大利米兰、巴西圣保罗、英国伦敦、印度新德里、秘鲁利马、中国北京、哥伦比亚波哥大、肯尼亚内罗比 10 个城市的气候数据,包括日平均温度、日平均露点、日平均相对湿度、日平均风速、日平均大气压强、日温差,来自气象网站(<https://www.wunderground.com/>),如图 2 和附图 A1 所示。城市(国家)的人口规模来自百度百科(<https://baike.baidu.com/>),人口规模与其面积相除得到人口密度,如图 1(d)所示。此外,城市(国家)的控制措施来自维基百科(<https://zh.wikimedia.org/>),见图 1(a)~(c)。

### 1.2 基于纵向数据的 Poisson 回归模型

在分析纵向数据时,有必要考虑多个响应变量多次测量的内在相关性,及在特定时间点响应变量与其他时间点协变量之间的相关性。Poisson 回归模型被广泛用于估计时间序列与环境变量之间的关系,包括气候变化和其他时变混杂因素<sup>[13-14]</sup>。因此,本文通过建立 Poisson 回归模型,探讨 COVID-19 新增病例数与气候因素、控制措施和人口密度之间的关系。

假设 COVID-19 日新增病例数服从 Poisson 分布,均值为  $E(Y_{i,t})$ ,  $Y_{i,t}$  为第  $i$  个城市(国家)第  $t$  天的 COVID-19 病例数观测值。同时,考虑气候因素

的时滞效应。用  $c_0 + c_1 t \sin \frac{2\pi}{60} t + c_2 t \cos \frac{2\pi}{60} t$  表征 COVID-19 日新增病例数受气候因素的长期趋势和季节变化的影响(季节变化周期为 60 d,  $c_0, c_1$  和  $c_2$  是未知常数)。

由于在突发性传染病(如 COVID-19 疫情)出现初期,随着新增病例数的增加,相关防控部门将采取相应的控制措施,控制措施的强度用  $\gamma + \nu t$  刻画,  $\gamma$  和  $\nu$  分别为干预的随机效应和随机斜率<sup>[15]</sup>。由于人口密度的量级较大,为提高参数的估计精度,对人口密度取对数,用  $\text{Pop}_i$  表示第  $i$  个城市(国家)的人口密度,得到模型:

$$\begin{aligned} \lg [E(Y_{i,t})] = & \alpha + c_1 t \sin \left( \frac{2\pi}{60} t \right) + \\ & c_2 t \cos \left( \frac{2\pi}{60} t \right) + \beta_1 T_{i,t-l} + \beta_2 \text{DW}_{i,t-l} + \\ & \beta_3 \text{Humi}_{i,t-l} + \\ & \beta_4 \text{WS}_{i,t-l} + \beta_5 P_{i,t-l} + \beta_6 \text{DT}_{i,t-l} + \\ & \delta \lg (\text{Pop}_i) + (\gamma + \nu t) \text{CM}_{i,t-l}, \\ & i = 1, 2, \dots, 20, t = 1, 2, \dots, 60, \\ & l = 0, 1, \dots, 7, \end{aligned} \quad (1)$$

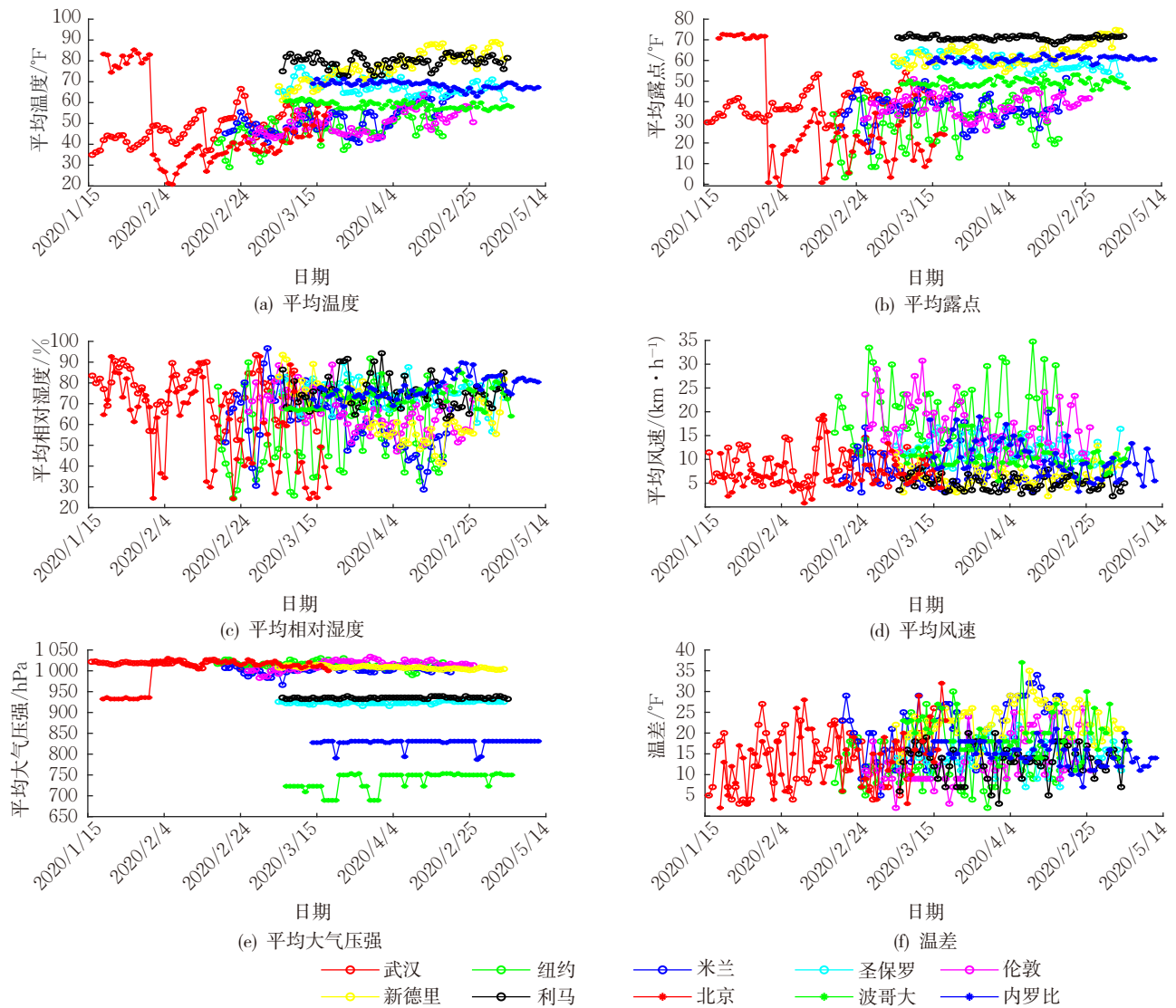


图2 2020年1月16日至5月12日10个城市的气候因素时间序列

其中, $\alpha$ 为常量, $l$ 为时滞,由COVID-19的潜伏期决定(平均为3~7 d)<sup>[16]</sup>;  $T_{i,t-l}$ ,  $DW_{i,t-l}$ ,  $Humi_{i,t-l}$ ,  $WS_{i,t-l}$ ,  $P_{i,t-l}$ ,  $DT_{i,t-l}$ 分别为第*i*个城市(国家)第*t-l*天的平均温度、平均露点、平均相对湿度、平均风速、平均大气压强、温差; $CM_{i,t-l}$ 为二分类变量,表示第*i*个城市(国家)第*t-l*天是否采取控制措施,如是, $CM_{i,t-l}=1$ ,否则 $CM_{i,t-l}=0$ 。

由于COVID-19疫情可能受气候因素交互作用的影响,将气候因素交互作用嵌入模型(1),最终得到10个候选的 Poisson 回归模型(见附件式(A1)~(A10))。通过GEE获得最优模型:

$$\lg [E(Y_{i,t})]=\alpha+c_1 t \sin \left(\frac{2 \pi}{52} t\right)+c_2 t \cos \left(\frac{2 \pi}{52} t\right)+\beta_1 T_{i,t-l}+\beta_2 DW_{i,t-l}+\beta_3 Humi_{i,t-l}+\beta_4 WS_{i,t-l}+\beta_5 P_{i,t-l}+\beta_6 DT_{i,t-l}+\beta_7 T_{i,t-l} Humi_{i,t-l}+\beta_8 T_{i,t-l} WS_{i,t-l}+\beta_9 T_{i,t-l} P_{i,t-l}+\beta_{10} Humi_{i,t-l} WS_{i,t-l}+\beta_{11} Humi_{i,t-l} P_{i,t-l}+\beta_{12} Humi_{i,t-l} DT_{i,t-l}+\beta_{13} WS_{i,t-l} P_{i,t-l}+\beta_{14} WS_{i,t-l} DT_{i,t-l}+\beta_{15} P_{i,t-l} DT_{i,t-l}+\delta \lg (\text {Pop}_i)+(\gamma+\nu t) CM_{i,t-l}, \quad i=1,2, \cdots, 20, t=1,2, \cdots, 60, l=0,1, \cdots, 7,$$

其中,  $T_{i,t-l}Humi_{i,t-l}$ 为第*i*个城市(国家)第*t-l*天平均温度与相对湿度之间的交互作用,其他类似。

1.3 基于GEE的模型选择与参数估计

GEE被广泛用于基于纵向数据的广义线性模型参数估计<sup>[17-18]</sup>。对于任何指定形式的工作相关矩阵(刻画指数分布族因变量内部的相关性),均可通过GEE获得模型参数的一致性和渐近性估计<sup>[17-19]</sup>。

本文涉及独立、可交换、一阶自回归(AR(1))、M相关和非结构化5种工作相关矩阵,采用QICC值最小方法选择最优的工作相关矩阵。此外,为比



较候选模型对 COVID-19 日新增病例数观测值的拟合程度,用 QICC 作为衡量指标。QICC 越小,表明模型对观测数据的拟合效果越好。

## 2 结 果

### 2.1 COVID-19 日新增病例数与气候因素的分布特征

武汉、纽约、北京、塞尔维亚、伊朗、土耳其、法国、比利时、德国、泰国的 COVID-19 日新增病例数均呈先增加后降低的趋势,最大值分别为 3 910,6 088,29,445,3 186,5 138,7 500,5 223,6 933,188,见图 1(a)~(c),详

细数据见附件表 A1 和表 A2。可知,除肯尼亚和西班牙的 COVID-19 日新增病例数呈波动增长外,其他地区的日新增病例数持续增加。日新增病例数最大值在 7 500 例及以上的城市(国家)有米兰、巴西、英国、俄罗斯、西班牙、法国,其均值(标准差)分别为 5 768.90(5 612.61),1 697.03(1 895.98),2 390.85(2 309.92),3 494.47(3 790.36),3 662.70(2 829.00),2 199.37(1 909.46),标准偏差较大,表明其日新增病例数变化迅速,感染较严重。武汉、秘鲁、比利时、纽约、德国、伊朗、印度、土耳其的 COVID-19 疫情相对严重,其日新增病例数的最大值为[1 000,7 500)。其他地区日新增病例数相对较少,低于 1 000 例。

表 1 10 个候选模型的 QICC 值  
Table 1 The QICC value for ten models in supporting information

| 模型  | QICC/ $\times 10^6$ |         |         |         |         |         |         |         |
|-----|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     | $l=0$ d             | $l=1$ d | $l=2$ d | $l=3$ d | $l=4$ d | $l=5$ d | $l=6$ d | $l=7$ d |
| A1  | 2.256 4             | 2.264 0 | 2.275 2 | 2.291 3 | 2.298 9 | 2.298 2 | 2.298 1 | 2.296 3 |
| A2  | 2.218 7             | 2.233 7 | 2.239 6 | 2.260 7 | 2.278 2 | 2.278 9 | 2.286 1 | 2.286 5 |
| A3  | 2.185 5             | 2.199 1 | 2.214 7 | 2.240 3 | 2.259 9 | 2.263 7 | 2.253 0 | 2.258 1 |
| A4  | 2.151 0             | 2.156 9 | 2.164 4 | 2.199 5 | 2.224 5 | 2.228 5 | 2.215 3 | 2.218 3 |
| A5  | 2.150 3             | 2.156 5 | 2.164 2 | 2.197 5 | 2.221 8 | 2.222 0 | 2.206 8 | 2.206 1 |
| A6  | 2.147 3             | 2.154 0 | 2.161 9 | 2.195 9 | 2.221 0 | 2.222 0 | 2.205 6 | 2.205 1 |
| A7  | 2.142 7             | 2.147 2 | 2.154 7 | 2.189 6 | 2.216 3 | 2.216 8 | 2.201 4 | 2.198 2 |
| A8  | 2.140 3             | 2.144 4 | 2.151 7 | 2.188 8 | 2.213 4 | 2.214 9 | 2.200 8 | 2.198 2 |
| A9  | 2.139 2             | 2.143 5 | 2.151 7 | 2.188 5 | 2.212 8 | 2.214 3 | 2.197 7 | 2.194 9 |
| A10 | 2.135 9             | 2.138 4 | 2.147 5 | 2.184 8 | 2.207 5 | 2.209 2 | 2.194 5 | 2.192 1 |

图 2 为 10 个城市的气候因素时间序列,可知,武汉的平均温度、平均露点、平均相对湿度、平均风速、平均大气压强、温差 6 个气候因素的中位数(第 25 个百分点,第 75 个百分点)分别为 42.71 °F(47.71 °F、53.39 °F),34.19 °F(39.25 °F、44.05 °F),69.14%(76.71%、84.63%),7.58 km·h<sup>-1</sup>(5.72 km·h<sup>-1</sup>、11.45 km·h<sup>-1</sup>),1 017.49 hPa(1 013.89 hPa、1 019.40 hPa),7.00 °F(13.50 °F、19.50 °F)。

在相同的气候条件下,不同地区 COVID-19 疫情严重程度不同。例如,纽约、比利时、俄罗斯和伊朗均属于温带大陆性气候,但其 COVID-19 病例数的分布差异较大。特别是在研究期内,纽约和伊朗的气候特征非常接近,但二者病例数差异很大。这进一步表明,COVID-19 疫情的暴发可能由多种因素引起,其中重要因素可能是控制措施、人们应对疫情的个体行为和人口密度,而不是气候因素。因此,

需将控制措施嵌入统计模型,探讨气候因素、控制措施和人口密度对 COVID-19 疫情的影响。

### 2.2 模型选择及参数估计结果

采用 Poisson 回归模型和 GEE,分析 COVID-19 日新增病例数与气候因素、控制措施和人口密度之间的关系,得到当时滞  $l$  为 0~7 d 时,模型 A10(式(2))的工作相关矩阵的 QICC 最小。由表 1 可知,当将因变量结构固定为独立变量时,式(2)的 QICC 最小。因此,根据已搜集的数据,选择式(2)作为最优模型。

在不同时滞水平下,式(2)中具有统计显著性的参数估计值,包括点估计  $\hat{B}$ 、 $\hat{B}$  对应的指数二次型  $e^{\hat{B}}$  和置信区间( $e^{\hat{B}_L}$ 、 $e^{\hat{B}_U}$ ),见表 2。

基于式(2),利用 Wald's 检验<sup>[20]</sup>,可知,在时滞为 0~7 d 时,控制措施( $\gamma + \nu t$ )为最重要因素。当时滞为 0 时,控制措施的作用为  $-3.098 + 0.125t$ ,这意

表 2 不同时滞水平下式(2)中具有统计显著性的参数估计值

Table 2 Parametric estimated value for statistically significant at different lag level based on the collected data including COVID-19 cases, meteorological factors, the control measures, population density and Poisson regression model (2)

| 时滞 $l/d$ | 参数        | $\hat{B}$ | $e^{\hat{B}}$ | $e^{\hat{B}_L}$ | $e^{\hat{B}_U}$ | 时滞 $l/d$ | 参数        | $\hat{B}$ | $e^{\hat{B}}$ | $e^{\hat{B}_L}$ | $e^{\hat{B}_U}$ |
|----------|-----------|-----------|---------------|-----------------|-----------------|----------|-----------|-----------|---------------|-----------------|-----------------|
| 0        | $c_1$     | 0.010     | 1.010         | 1.002           | 1.018           | 4        | $c_2$     | -0.034    | 0.966         | 0.952           | 0.980           |
|          | $c_2$     | -0.033    | 0.968         | 0.956           | 0.980           |          | $\beta_2$ | -0.289    | 0.749         | 0.566           | 0.991           |
|          | $\beta_1$ | 0.486     | 1.625         | 1.094           | 2.415           |          | $\beta_9$ | 0.171     | 1.187         | 1.023           | 1.378           |
|          | $\beta_2$ | -0.411    | 0.663         | 0.480           | 0.916           |          | $\gamma$  | -4.051    | 0.017         | 0.002           | 0.139           |
|          | $\beta_7$ | 0.175     | 1.192         | 1.030           | 1.379           |          |           |           |               |                 |                 |
|          | $\beta_8$ | -0.165    | 0.848         | 0.743           | 0.968           | 5        | $c_2$     | -0.036    | 0.965         | 0.951           | 0.980           |
|          | $\beta_9$ | 0.162     | 1.176         | 1.013           | 1.366           |          | $\beta_2$ | -0.254    | 0.776         | 0.603           | 0.998           |
|          | $\gamma$  | -3.098    | 0.045         | 0.008           | 0.253           |          | $\beta_7$ | 0.145     | 1.156         | 1.001           | 1.334           |
|          | $\nu$     | 0.125     | 1.133         | 1.097           | 1.171           |          | $\beta_9$ | 0.170     | 1.185         | 1.029           | 1.364           |
| 1        | $c_1$     | 0.009     | 1.009         | 1.001           | 1.017           |          | $\gamma$  | -4.411    | 0.012         | 0.001           | 0.105           |
|          | $c_2$     | -0.033    | 0.968         | 0.955           | 0.980           |          | $\nu$     | 0.141     | 1.152         | 1.097           | 1.210           |
|          | $\beta_1$ | 0.434     | 1.543         | 1.079           | 2.208           | 6        | $c_2$     | -0.036    | 0.964         | 0.950           | 0.979           |
|          | $\beta_2$ | -0.397    | 0.672         | 0.490           | 0.922           |          | $\beta_8$ | -0.115    | 0.892         | 0.796           | 1.000           |
|          | $\beta_3$ | 0.282     | 1.326         | 1.016           | 1.732           |          | $\beta_9$ | 0.168     | 1.182         | 1.024           | 1.365           |
|          | $\beta_7$ | 0.167     | 1.182         | 1.015           | 1.377           |          | $\gamma$  | -4.681    | 0.009         | 0.001           | 0.085           |
|          | $\beta_8$ | -0.161    | 0.851         | 0.746           | 0.971           |          | $\nu$     | 0.145     | 1.155         | 1.098           | 1.216           |
|          | $\beta_9$ | 0.183     | 1.201         | 1.032           | 1.397           | 7        | $c_2$     | -0.036    | 0.964         | 0.949           | 0.980           |
|          | $\gamma$  | -3.306    | 0.037         | 0.006           | 0.228           |          | $\beta_7$ | 0.128     | 1.137         | 1.020           | 1.267           |
|          | $\nu$     | 0.128     | 1.136         | 1.096           | 1.178           |          | $\beta_9$ | 0.165     | 1.180         | 1.021           | 1.363           |
| 2        | $c_2$     | -0.033    | 0.967         | 0.955           | 0.981           |          | $\gamma$  | -4.890    | 0.008         | 0.001           | 0.081           |
|          | $\beta_1$ | 0.384     | 1.469         | 1.037           | 2.080           |          | $\nu$     | 0.146     | 1.158         | 1.094           | 1.225           |
|          | $\beta_2$ | -0.376    | 0.687         | 0.496           | 0.951           | 3        |           |           |               |                 |                 |
|          | $\beta_3$ | 0.268     | 1.307         | 1.002           | 1.705           |          | $c_2$     | -0.034    | 0.967         | 0.953           | 0.980           |
|          | $\beta_7$ | 0.180     | 1.197         | 1.032           | 1.387           |          | $\beta_1$ | 0.350     | 1.419         | 1.029           | 1.956           |
|          | $\beta_9$ | 0.196     | 1.216         | 1.045           | 1.416           |          | $\beta_2$ | -0.350    | 0.704         | 0.523           | 0.949           |
|          | $\gamma$  | -3.550    | 0.029         | 0.004           | 0.199           |          | $\beta_7$ | 0.168     | 1.183         | 1.017           | 1.375           |
|          | $\nu$     | 0.130     | 1.139         | 1.095           | 1.185           |          | $\beta_9$ | 0.173     | 1.189         | 1.018           | 1.389           |
| 3        |           |           |               |                 |                 |          | $\gamma$  | -3.834    | 0.022         | 0.003           | 0.158           |
|          |           |           |               |                 |                 |          | $\nu$     | 0.134     | 1.144         | 1.097           | 1.193           |

味着在实施控制措施的当天,发病率为 0.045,95% 置信区间为[0.008,0.253]。当控制措施从无到有时,预期的新增病例数将减少 4.5%,95% 置信区间为[0.8%,25.3%]。随着时滞  $l$  的增加, $\gamma$  的绝对值增加,表明控制措施对预防和控制 COVID-19 疫情的效果增强。此外, $\nu$  的估计值随时滞  $l$  的增加而

增加,表明控制措施的实施强度随时间的推移而降低。控制措施是重要的因素这一结论与文献[21]一致。

日平均温度对 COVID-19 发病率有正的统计显著性影响,当时滞为 0 时,发病率为 1.625,95% 置信区间为[1.094,2.415]。也就是说,在正常平均温

度水平下,日平均温度升高 1 °F,预期的 COVID-19 新增病例数将增加 25.8%,95% 置信区间为 [0.174,0.384]。另外, $\beta_1$  的估计值随时滞  $l$  的增加而减小,表明日平均温度对 COVID-19 的影响随着时滞  $l$  的增加而减小。这与 BASHIR 等<sup>[1]</sup>和 SHI 等<sup>[5]</sup>的研究一致,后者认为平均温度是 COVID-19 疫情传播的驱动因素。

气候因素的长期趋势和季节变化对 COVID-19 疫情有很大影响。当时滞为 0~5 和 1~2 d 时,平均露点对 COVID-19 发病率有显著负面影响,而平均相对湿度有正面影响。平均露点升高可以抑制 COVID-19 的传播速度。因为平均露点取决于平均温度和平均相对湿度,空气平均温度须在恒压下冷却才能达到饱和,含有 COVID-19 的气溶胶蒸发可能受平均露点的影响。

此外,在不同的时滞水平下,平均温度与平均相对湿度、平均温度与平均风速、平均温度与平均大气压强之间的交互作用具有统计显著性。平均温度与平均相对湿度之间的交互作用进一步验证了已有的研究结果<sup>[1-2,22-23]</sup>。这是因为平均温度和平均相对湿度对 COVID-19 的死亡率有很大影响<sup>[24]</sup>。笔者发现,平均温度与平均相对湿度的交互作用与 COVID-19 的发病率存在正相关关系,表明适当的平均温度和平均相对湿度有利于病毒存活。此外,温差和人口密度对 COVID-19 疫情有一定的影响,但不显著。

### 3 结论与讨论

通过 Poisson 回归模型和 GEE 研究了 COVID-19 病例的分布特征和增长趋势,得到:(1) 气候因素的长期趋势和季节变化对 COVID-19 疫情有显著影响;(2) 平均温度和平均相对湿度对 COVID-19 疫情有正面影响,平均露点对 COVID-19 疫情有负面影响;(3) 在不同时滞水平下,平均温度与平均相对湿度、平均温度与平均风速、平均温度与平均大气压强间的交互作用具有统计显著性;(4) 控制措施对 COVID-19 疫情的影响最显著。以上给出的关键因素,可供防疫部门在制定公共卫生管理措施时参考。

首先,通过 Poisson 模型和 GEE 推断出气候因素的长期趋势和季节变化对 COVID-19 疫情有显著影响。由于平均温度、平均相对湿度、平均大气压强等环境因素随季节变化,影响病毒的存活和传染病的传

播;同时,人体免疫系统也会随季节变化做出相应的反应,影响人体免疫力。此外,MICAELA<sup>[25]</sup>的研究表明,至少 68 种传染病是受季节变化影响的,因季节变化而异,影响也并不同步。需要注意的是,一些疾病在不同的地理位置有不同的季节高峰,甚至呈现不规则变化。

然后,通过 GEE 进一步确定平均温度和平均相对湿度(平均露点)对 COVID-19 疫情的正面(负面)影响。平均温度和平均相对湿度的影响与文献<sup>[1-2]</sup>一致,更重要的是,平均温度与平均相对湿度、平均温度与平均风速、平均温度与平均大气压强的交互作用在不同时滞水平上对 COVID-19 疫情具有统计显著性,这对于探索气候因素对 COVID-19 疫情的影响非常重要。

控制措施是 COVID-19 疫情的重要影响因素的可能原因是:疫情防控部门强有力的政策,如居家隔离、控制人口流动、强制隔离等,即“早发现、早诊断、早治疗、早隔离”;媒体宣传、专家引导、改变人们的行为方式;个体对控制措施的响应,例如戴口罩、经常洗手和避免去公共场所。

与以往相关研究<sup>[1-5,12]</sup>不同,本文基于纵向数据,得到 COVID-19 疫情的影响因素并不是单一的而是多方面的。研究结果表明,COVID-19 在适当的平均温度、平均相对湿度、平均露点、平均风速和平均大气压强范围内具有很大的传播风险,说明对环境因素的监测和预警(如全球协作增强气候变化和传染病抵御能力),可以积极评估气候变化对人们健康的影响,有效地识别高危人群、进行地区规划、引导高风险地区人们的行为改变,从而降低感染风险。

本文存在一定的局限性。首先,仅研究了每个地区 60 d 的数据;其次,由于缺乏疫情的季节变化周期,没有可供参考的文献,只能通过数据粗略估计;再次,由于许多模型因变量的内部结构较为复杂,只考虑了时滞为 0~7 d;最后,对于突发性传染病 COVID-19,需要更多的变量进行全面研究,如个体行为改变、人们的忍耐力和卫生设施的可利用性、空气污染等。

综上,为了缓解和控制 COVID-19 疫情,相关防控部门应采取有效的、强有力的控制措施,并根据气象站对气候因素的预测,制定相应的管控措施。

附件内容请扫描二维码获取:



## 参考文献(References):

- [1] BASHIR M, MA B, BILAL, et al. Correlation between climate indicators and COVID-19 pandemic in New York, USA [J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 728: 138835. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138835.
- [2] TOSEPU R, GUNAWAN J, EFFENDY D, et al. Correlation between weather and COVID-19 pandemic in Jakarta, Indonesia [J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 725: 138436. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138436.
- [3] PRATA D, RODRIGUES W, BERMEJO P. Temperature significantly changes COVID-19 transmission in (sub) tropical cities of Brazil [J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 729: 138862. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138862.
- [4] LIU J, ZHOU J, YAO J, et al. Impact of meteorological factors on the COVID-19 transmission: A multicity study in China[J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 726: 138513. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138513.
- [5] SHI P, DONG Y, YAN H, et al. Impact of temperature on the dynamics of the COVID-19 outbreak in China [J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 728: 138890. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138890.
- [6] KUBOTA Y, SHIONO T, KUSUMOTO B, et al. Multiple drivers of the COVID-19 spread: Role of climate, international mobility, and region-specific conditions[J]. **PLoS ONE**, 2020, 15(9): e0239385. DOI:10.1101/2020.04.20.20072157.
- [7] MECENAS P, BASTOS R, VALLINOTO A, et al. Effects of temperature and humidity on the spread of COVID-19: A systematic review[J]. **PLoS ONE**, 2020, 15 (9) : e0238339. DOI: 10.1101/2020.04.14.20064923.
- [8] RUNKLE J, SUGG M, LEEPER R, et al. Short-term effects of specific humidity and temperature on COVID-19 morbidity in select US cities[J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 740: 140093. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.140093.
- [9] BOLDOG P, TEKELI T, VIZI Z, et al. Risk assessment of novel coronavirus COVID-19 outbreaks outside China [J]. **Journal of Clinical Medicine**, 2020, 9(2): 571. DOI:10.3390/jcm 9020571.
- [10] TANG B, WANG X, LI Q, et al. Estimation of the transmission risk of 2019-nCov and its implication for public health interventions [J]. **Journal of Clinical Medicine**, 2020, 9 (2) : 462. DOI: 10.3390/jcm 9020462.
- [11] TANG B, BRAGAZZI N, LI Q, et al. An updated estimation of the risk of transmission of the novel coronavirus (2019-nCov) [J]. **Infectious Disease Modelling**, 2020, 5: 248-255. DOI: 10.1016/j.idm.2020.02.001.
- [12] YAN Q L, TANG L Y, YAN D D, et al. Impact of media reports on the early spread of COVID-19 epidemic[J]. **Journal of Theoretical Biology**, 2016, 390:1-13. DOI:10.1016/j.jtbi.2015.11.002.
- [13] MCCULLAGH P M, NELDER J A S, 1989. **Generalized Linear Models**[M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall, CRC, 1989.
- [14] DOMINICI F, SHEPPARD L, CLYDE M. Health effects of air pollution: A statistical review [J]. **International Statistical Review**, 2003, 71 (2) : 243-276.
- [15] WATSON G, XIONG D, ZHANG L, et al. Pandemic velocity: Forecasting COVID-19 in the US with a machine learning & Bayesian time series compartmental model [J]. **PLoS Computational Biology**, 2021, 17(3): e1008837. DOI:10.1371/journal.pcbi.1008837.
- [16] GUAN W, NI Z, HU Y, et al. Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China[J]. **Journal of Integrative Medicine**, 2020, 18: 395-400. DOI: 10.1016/j.joim.2020.07.002.
- [17] ZEGER S, LIANG K. Longitudinal data analysis for discrete and continuous outcomes [J]. **Biometrics**, 1986, 42(1): 121-130.
- [18] LIANG K, ZEGER S. Longitudinal data analysis using generalized linear models [J]. **Biometrika**, 1986, 73 (1): 13-22.
- [19] ZEGER S, LIANG K. An overview of methods for the analysis of longitudinal data [J]. **Statistics in Medicine**, 1992, 2: 1825-1839.
- [20] HAUCK W, DONNER A. Wald's test as applied to hypotheses in logit analysis [J]. **Journal of the American Statistical Association**, 1977, 72 (360) : 851-853.
- [21] JUNI P, ROTHENBUHLER M, BOBOS P, et al. Impact of climate and public health interventions on the COVID-19 pandemic: A prospective cohort study [J]. **Canadian Medical Association Journal**, 2020, 192 (21) : E566-E573. DOI: 10.1503/cmaj.200920.
- [22] SAJADI M, HABIBZADEH P, VINTZILEOS A, et al. Temperature, humidity, and latitude analysis to



- estimate potential spread and seasonality of coronavirus disease 2019 (COVID-19) [J]. **JAMA Network Open**, 2020, 3(6): e2011834. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2020.11834.
- [23] WANG Y, WANG Y, CHEN Y, et al. Unique epidemiological and clinical features of the emerging 2019 novel coronavirus pneumonia (COVID-19) implicate special control measures [J]. **Journal of Medical Virology**, 2020, 92(6): 568-576. DOI: 10.1002/jmv.25748.
- [24] MA Y, ZHAO Y, LIU J, et al. Effects of temperature variation and humidity on the mortality of COVID-19 in Wuhan [J]. **Science of the Total Environment**, 2020, 724: 138226. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138226.
- [25] MARTINEZ M. The calendar of epidemics: Seasonal cycles of infectious diseases [J]. **PLOS Pathog**, 2018, 14(11): e1007327. DOI: 10.1371/journal.ppat.1007327.
- (上接第 143 页)
- [14] LIU T, YANG B C, HE L P. On a multidimensional Hilbert-type integral inequality with logarithm function [J]. **Mathematical Inequalities and Applications**, 2015, 18(4): 1219-1234. DOI: 10.7153/mia-18-94
- [15] YANG B C. A multidimensional discrete Hilbert-type inequality [J]. **International Journal of Nonlinear Analysis and Applications**, 2014, 5(1): 80-88.
- [16] 和炳, 曹俊飞, 杨必成. 一个全新的多重 Hilbert 型积分不等式 [J]. **数学学报**, 2015, 58(4): 661-672.
- HE B, CAO J F, YANG B C. A brand new multiple Hilbert-type integral inequality [J]. **Acta Mathematica Sinica**, 2015, 58(4): 661-672.
- [17] 洪勇. 一类具有准齐次核的涉及多个函数的 Hilbert 型积分不等式 [J]. **数学学报**, 2014, 57(5): 833-840.
- HONG Y. A Hilbert-type integral inequality with quasi-homogeneous kernel and several functions [J]. **Acta Mathematica Sinica**, 2014, 57(5): 833-840.
- [18] 洪勇. 一类带齐次核的奇异重积分算子的范数及其应用 [J]. **数学年刊 A 辑 (中文版)**, 2011, 32(5): 599-606.
- HONG Y. On the norm of singular multiple integral operator with homogeneous kernel and its application [J]. **Chinese Annals of Mathematics (Ser A)**, 2011, 32(5): 599-606.
- [19] 洪勇, 温雅敏. 齐次核的 Hilbert 型级数不等式取最佳常数因子的充要条件 [J]. **数学年刊 A 辑 (中文版)**, 2016, 37(3): 329-336.
- HONG Y, WEN Y M. A necessary and sufficient conditions of that Hilbert-type series inequality with homogeneous kernel has the best constant factor [J]. **Chinese Annals of Mathematics (Ser A)**, 2016, 37(3): 329-336.
- [20] HONG Y, HE B, YANG B C. Necessary and sufficient conditions for the validity of Hilbert-type integral inequalities with a class of quasi-homogeneous kernels and its application in operator theory [J]. **Journal of Mathematical Inequalities**, 2018, 12(3): 777-788. DOI: 10.7153/jmi-2018-12-59
- [21] CAO J F, HE B, HONG Y, et al. Equivalent conditions and applications of a class of Hilbert-type integral inequalities involving multiple functions with quasi-homogeneous kernels [J]. **Journal of Inequalities and Applications**, 2018 (2018): 206. DOI: 10.1186/s13660-018-1797-5
- [22] 徐利治, 郭永康. 关于 Hilbert 不等式的 Hardy-Riesz 推广的注记 [J]. **数学季刊**, 1991, 6(1): 75-77.
- XU L Z, GUO Y K. Note on Hardy-Riesz's extension of Hilbert's inequality [J]. **Chinese Quarterly Journal of Mathematics**, 1991, 6(1): 75-77.
- [23] FICHTINGOLOZ G M. 微积分教程 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1957: 404-423.
- FICHTINGOLOZ G M. **A Course in Differential and Integral Calculus** [M]. Beijing: People Education Press, 1957: 404-423.