

# 气态污染物浓度对流感暴发风险的影响

马晓璐<sup>1</sup>, 杨杨<sup>1</sup>, 黄悦<sup>1</sup>, 马盼<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

<sup>2</sup>高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都

收稿日期: 2023年10月16日; 录用日期: 2023年11月16日; 发布日期: 2023年11月23日

## 摘要

为探究深圳市气态污染物浓度对流感暴发疫情的潜在影响, 为流感的防控提供参考依据。本研究收集了2013年5月1日至2015年12月31日的深圳市流感暴发疫情逐日监测数据, 以及该时间段内气象要素与大气污染物浓度数据, 区分两种流感病毒亚型(甲流、乙流), 通过建立分布-滞后模型(Distributed-Lag Nonlinear Model, DLNM)研究流感暴发风险与三种气态污染物( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{O}_3$ )浓度的关联性。结果表明, 冷季(11月4日至次年4月20日)两种病毒亚型的暴发高峰基本与 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 的浓度高峰相对应; 而暖季(4月19日至11月3日)大气中高浓度的 $\text{O}_3$ 常伴随着流感的暴发。冷季高浓度的 $\text{NO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 对甲流疫情存在显著的短期滞后影响。暴发当天 $68.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{P}_{95}$ )的 $\text{NO}_2$ 和 $21.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{P}_{95}$ )的 $\text{SO}_2$ 相关联的相对危险度(Relative Risk, RR)分别为3.04 (95% CI: 2.07~4.48)和1.76 (95% CI: 1.08~2.88)。然而,  $\text{NO}_2$ 对乙流疫情的影响不显著,  $\text{SO}_2$ 在滞后3~5 d时对乙流有微弱影响, 例如, 滞后4 d时 $21.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{P}_{95}$ )  $\text{SO}_2$ 相关联的RR = 1.45 (95% CI: 1.12~1.80)。在暖季, 高浓度的 $\text{O}_3$ 对流感暴发存在显著影响。对甲流而言, 在滞后3 d时效应最为显著,  $162.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\text{P}_{95}$ )  $\text{O}_3$ 的RR = 2.42 (95% CI: 1.12~5.42); 对乙流而言, 暴发当日影响最强烈,  $162.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{O}_3$ 的RR = 3.50 (95% CI: 1.54~7.96)。此外, 冷季 $\text{O}_3$ 浓度本身较低, 且对流感的影响不甚显著。综上,  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 在冷季对甲流疫情的影响更为显著, 而高浓度 $\text{O}_3$ 在暖季也会增加流感风险。

## 关键词

流感, 暴发疫情, 气态污染物, 时间序列模型, 深圳

# The Influence of Gaseous Pollutants Concentration on Influenza Outbreak Risk

Xiaolu Ma<sup>1</sup>, Yang Yang<sup>1</sup>, Yue Huang<sup>1</sup>, Pan Ma<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

\*通讯作者。

## Abstract

To explore the potential impact of gaseous pollutant concentration on influenza outbreak epidemics in Shenzhen, and provide a scientific reference for influenza prevention and control, in this study, we collect the daily monitoring data of influenza outbreak in Shenzhen from May 1, 2013 to December 31, 2015, as well as local meteorological factors and atmospheric pollutant concentration during the same period. We differentiated two influenza virus subtypes, *i.e.*, influenza A and influenza B, to research the risk of influenza outbreak and lag effects of three gaseous pollutants (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub>), through establishing the Distributed-Lag Nonlinear Model (DLNM). The results show that, the peaks of two subtypes' outbreak in the cool season (November 4 to April 20 of the following year) basically corresponded to the high peaks of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>, while high concentration of O<sub>3</sub> in the warm season (April 19 to November 3) was accompanied by influenza epidemic. There was a significant short-term lag effect of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> during the cold season on the influenza A outbreak. The Relative Risk (RR) associated with 68.51 μg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>) of NO<sub>2</sub> and 21.77 μg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>) of SO<sub>2</sub> on the current day was 3.04 (95% CI: 2.07~4.48) and 1.76 (95% CI: 1.08~2.88), respectively. However, NO<sub>2</sub> did not show a significant influence on influenza B, while SO<sub>2</sub> had a weak effect at a lag of 3~5 d. For example, the RR of a 21.77 μg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>) SO<sub>2</sub> on lag 4 d was 1.45 (95% CI: 1.12~1.80). High concentration of O<sub>3</sub> had a significant effect on influenza during the warm season. For influenza A, the effect was strongest on lag 3 d, RR was 2.42 (95% CI: 1.12~5.42) for a 162.12 μg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>) of O<sub>3</sub>. With regard for influenza B, the strongest effect was on the day of outbreak, the RR at a concentration of 162.12 μg/m<sup>3</sup> was 3.50 (95% CI: 1.54~7.96). In addition, in the cool season, the concentration of O<sub>3</sub> was lower and had minor effect on influenza. In conclusion, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> have more significant effects on influenza A epidemic in the cold season, while high concentration of O<sub>3</sub> increases the risk of influenza in the warm season.

## Keywords

Influenza, Outbreak, Gaseous Pollutant, Time-Series Model, Shenzhen

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

流行性感冒(简称流感)是由流感病毒引起的一种急性呼吸道传染病,其临床特点为起病急,全身中毒症状明显,如发烧、头痛、干咳、全身酸痛等。20世纪以来,作为一种世界范围内流行的传染病,流感曾四次席卷全球,其中三次被认为是从中国开始暴发的[1]。由于易于传播和抗原的变异性,流感对公众健康产生巨大的威胁,会导致严重的并发症甚至死亡[2],全球每年有近10%的人口受流感影响,约五十万人因流感死亡[3]。感染人类的流感病毒主要为甲型(Flu-A)和乙型(Flu-B)两种病毒亚型[4] [5],不同亚型的暴发特点及其对人体的影响也存在差异[6]。

一些区域性研究报道了流感的发病伴随季节呈现显著差异[7] [8] [9]。最显著的特点为,温带地区的

低温会增加流感风险[10], 热带与亚热带地区的流感在年内往往存在多个高峰。此前深圳市的相关研究也发现, 流感疫情暴发主要发生在夏季与秋冬季节[11]。针对气象因子与流感疫情关系的研究已经比较充分, 包括平均温度、相对湿度、风速等均对流感暴发具有一定的影响[12] [13]。王锡玲的研究揭示了, 相对湿度较大时, 流感在低温或高温条件下达到高峰[14]。

大气中的气态污染物二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和臭氧( $\text{O}_3$ )等, 不仅是刺激性气体, 可侵入呼吸道粘膜, 对皮肤[15]、呼吸道疾病[16]、心血管疾病[17]等都具有一定的影响。上述气态污染物还可能增加流感病毒感染的可能性, 有助于促进流感的传播, 增加流感疫情暴发的风险[18]。

研究已表明, 大气污染物浓度表现出明显的季节变化特征,  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  的浓度一般在秋、冬季出现高峰, 而  $\text{O}_3$  的浓度在夏季或者秋季最高[19]。流感发病率对  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  最为敏感, 污染物浓度升高的地区最有可能发生流感[20]。杨松的研究发现, 冬季时  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  的浓度与流感发病率呈显著的正相关; 而夏季高浓度  $\text{O}_3$  影响流感发病率[21]。寒冷季节, 东部地区以及人口较多的省份的空气污染物与流感暴发风险的关联性较大[22]。

深圳市地处中国华南地区、珠江口东岸, 是中国第一个设立的经济特区, 也是中国经济中心城市, 人口密集。属于亚热带季风气候, 气候温和, 日照充足, 夏季长达 6 个多月(平均夏季长 202 天), 盛行偏南风, 高温多雨; 秋冬季节盛行东北季风, 天气干燥少雨, 且秋冬季空气污染物浓度相对偏高[23], 对人体健康具有一定的影响。

因此, 研究深圳市气态污染物对流感暴发风险的影响具有一定意义。本研究通过对 2013 年 5 月 1 日~2015 年 12 月 31 日深圳市流感发病人数、气态污染物浓度资料的数据进行分析, 结合气象要素, 重点探讨了在冷季气态污染物对流感疫情的影响, 以及暖季高浓度  $\text{O}_3$  的潜在影响。

## 2. 数据与分析

### 2.1. 数据来源

深圳市气象局提供自 2013 年 5 月 1 日~2015 年 12 月 31 日的气象数据。根据深圳市气象局对季节的划分(<http://www.sz.gov.cn/>) [24], 与该地夏长冬短的特点相结合, 本文将春季、秋季、冬季划分为冷季, 即 11 月 4 日至次年 4 月 20 日; 夏季划分为暖季, 即 4 月 19 日至 11 月 3 日。对气象数据进行平滑处理后, 将影响流感风险的主要气象要素纳入时间序列模型, 包括日平均气温(T)和相对湿度(RH)。

我国《流感样病例暴发疫情处置指南》(2018 年版)规定, 流感暴发是指同一地区或单位内在较短时间内出现异常增多的流感样病例(influenza-like-illness)。本文从深圳市疾病预防控制中心获取了 2013 年 5 月 1 日~2015 年 12 月 31 日的流感暴发病例数据。该数据包括了疫情暴发的地点、发病人数、报告人、核酸检测结果等。在研究期间, 确诊流感阳性病例为 1687 例, 筛选出冷季确诊病例为 1058 例(其中甲型 380 例, 乙型 678 例), 暖季确诊病例为 629 例(甲型 405 例, 乙型 224 例)。

此外, 深圳市生态环境局提供了该市 18 个国家级监测站的空气污染数据, 包括逐 3 小时观测的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  浓度数据, 将全市站点资料进行平均, 并转化为每日浓度与每日的流感样病例相对应。

### 2.2. 统计分析

因为流感样确诊病例遵循泊松分布, 为了能更好的评估气态污染物浓度与流感暴发的关系, 选用分布-滞后非线性模型(DLNM)。利用该模型, 分别构建了气象因子与环境要素的交叉基函数。由于各气象要素之间具有强烈的共线性, 控制共线性和过拟合等因素后, 构造每种气态污染物与流感疫情的关联性模型, 可得到影响的滞后时间和浓度阈值等。考虑到气态污染物的季节性特征, 本研究对于  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  构造关于冷季的时间序列模型, 评估其对流感暴发风险的影响。对于  $\text{O}_3$ , 在冷季和暖季分别构造模型进

行研究。

首先, 根据以往的研究, 确认影响深圳市流感暴发的主要气象因子为气温和相对湿度[16], 因此, 将温度、湿度带入模型。根据多次敏感性调试, 确定二者采用的自由度(degrees of freedom, df)均为 3, 最大滞后天数均为 14 天。

再者, 将 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 分别纳入上述模型, 从而建立起流感暴发风险与气态污染物浓度的关联性函数。其中节假日(holiday)和星期几(day of the week, DOW)作为哑变量被标记。

最终建立的 GAM 模型可以表示为:

$$\log[E(Y_t)] = \sum cb(Z_i, lag) + cb(T, df) + ns(time, df) + ns(RH, df) + \beta DOW_t + \gamma holiday_t + \alpha \quad (1)$$

其中, E(Y<sub>t</sub>)表示模型预估第 *t* 日的入院人数期望值, Y<sub>t</sub> 是第 *t* 天的流感确诊人数, Z 代表气态污染物的其中一种; cb(Z<sub>i</sub>)是所构造的交叉基函数, 用于模拟每日独立污染物变量的非线性滞后效应, lag 表示滞后时间, 一般认为 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 所引起效应较短, O<sub>3</sub> 时间较长[25]。因此, NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 设置滞后时间为 10 d, O<sub>3</sub> 的滞后时间为 14 d。DOW 和 holiday 分别控制星期几效应和节假日效应, α 表示模型残差。

结果采用相对危险度(Relative risk, RR)表示, 即由气态污染物导致的流感暴发风险与未暴露条件下流感风险的比值。当 RR > 1 时, 表示污染导致暴发风险增加, 取其 95%置信区间。模型采用 R3.6.1 软件中的“mgcv”和“dlnm”程序包建立。

### 3. 结果

#### 3.1. 描述性统计

表 1 所示为研究期间区分冷、暖季后, 深圳市流感确诊病例、气象因子(T, RH)、气态污染物(NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>)描述性统计的结果。其中, 甲流、乙流在冷季的流感暴发病例数均大于暖季。广东省的相关研究也表明了, 冬春季节流感阳性率高于夏季[26]。NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 在冷季的浓度大于暖季; 而 O<sub>3</sub> 的浓度在暖季较高。研究期间, 深圳市冷季的日平均温度与相对湿度的取值范围分别为 6.0~26.8℃、19.0~94%; 暖季分别为 18.8℃~33℃、34%~97%。

**Table 1.** Descriptive statistics of influenza outbreak epidemics and meteorological environmental variables

**表 1.** 流感暴发病例及气象环境要素的描述性统计特征

		平均值	最小值	百分位数				最大值
				P <sub>25</sub>	P <sub>50</sub>	P <sub>75</sub>	P <sub>95</sub>	
Flu-A (例)	冷季	1.01	0	0	0	0	7	33
	暖季	0.68	0	0	0	0	5.05	25
Flu-B (例)	冷季	1.80	0	0	0	0	11	32
	暖季	0.37	0	0	0	0	4	16
NO <sub>2</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	冷季	40.21	13.46	30.39	37.67	47.44	68.18	111.5
	暖季	31.16	10.91	24.88	29.23	36.5	48.36	64.67
SO <sub>2</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	冷季	11.64	3.86	7.61	10.42	14.32	21.8	50.95
	暖季	9.56	4.67	7.32	8.82	10.84	15.16	31.67
O <sub>3</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	冷季	81.84	21.86	60.29	79.92	101.95	126.86	151.65
	暖季	85.41	22.95	50.59	74.66	116.88	162.76	205.84
T (°C)	冷季	18.32	6	15.50	18.30	21.20	24.92	26.80
	暖季	27.52	18.80	26.20	27.95	29.30	30.40	33
RH (%)	冷季	67.72	19	59	71	79	88	94
	暖季	75.69	34	70	76	83	90	97

图 1 所示为深圳市甲流、乙流的病例数和  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  的浓度随时间的波动。由图所知，甲流暴发的高峰一般在 5~6 月、12 月左右；乙流暴发的高峰一般在 4 月、11~12 月。 $\text{NO}_2$  的浓度趋势呈双峰式，在每年冬季时出现高峰，夏季时出现低谷。 $\text{O}_3$  的浓度在夏季出现高峰，尤其是七、八月份污染最为严重，这与谢祖欣[27]的研究结果相一致。

流感的发病动态具有明显的季节性。受季节影响，同一种的气态污染物对流感的暴发具有一定的差异性。尤其是在冬季，气态污染物浓度较高，流感的暴发风险显著增加，这一研究与景双林[28]结果一致。

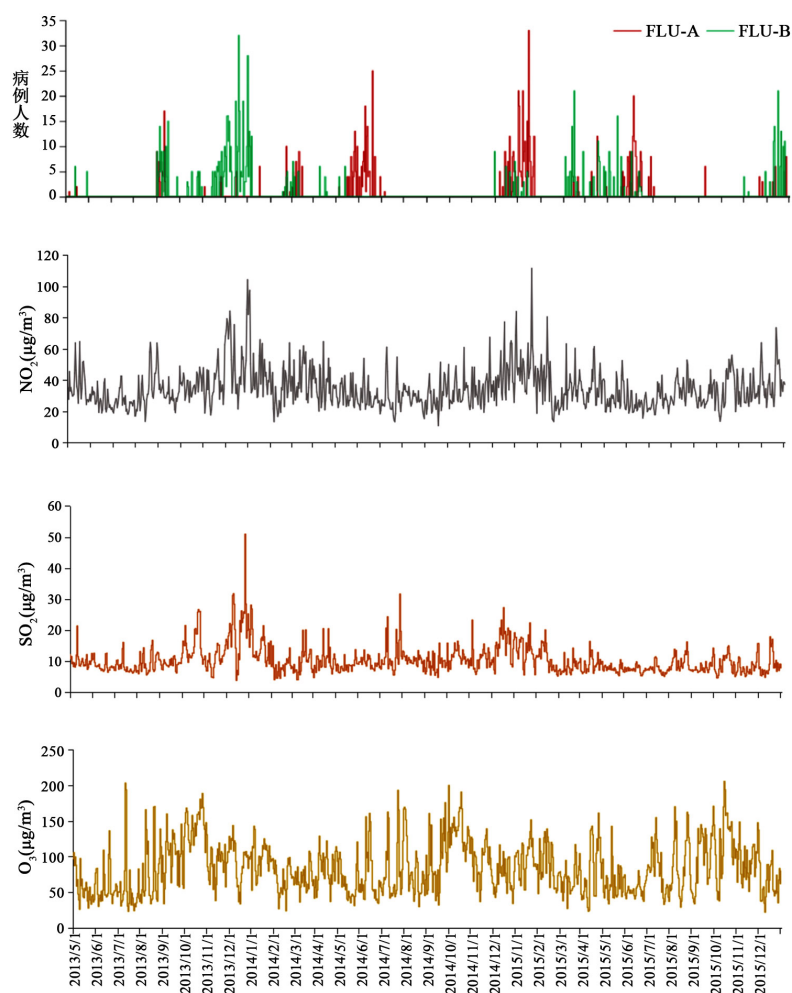


Figure 1. Time series of daily influenza confirmed-cases and gaseous pollutants in Shenzhen, from May 1, 2013, to Dec. 31, 2015

图 1. 深圳市 2013.5.1~2015.12.31 逐日流感确诊人次与气态污染物的时间序列

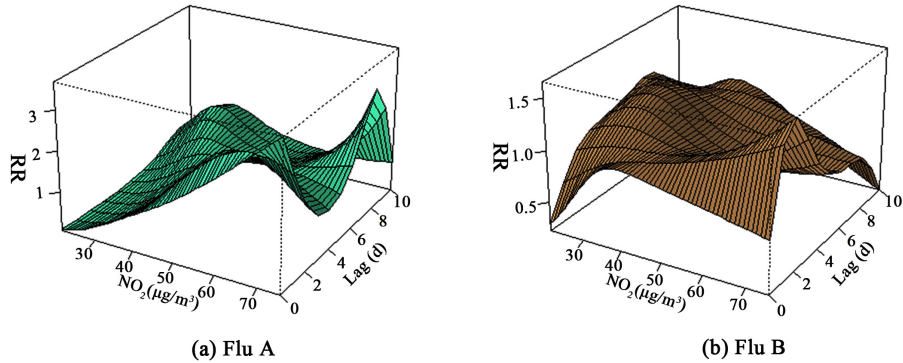
## 3.2. 气态污染物与流感暴发的关系

### 3.2.1. $\text{NO}_2$ 对流感暴发的影响

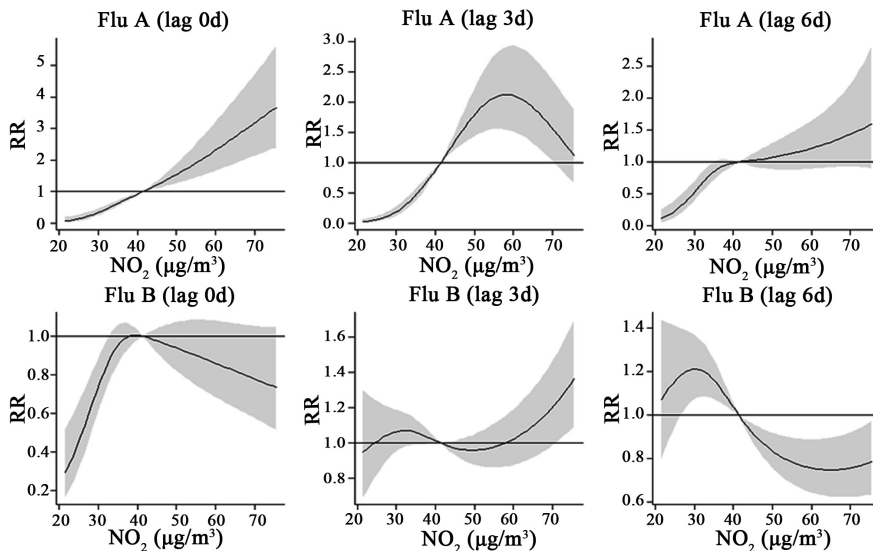
图 2 与图 3 展示了在冷季  $\text{NO}_2$  与两种流感的滞后关联性及在典型滞后日(0 d、3 d、6 d)的切片图。

整体而言， $\text{NO}_2$  对甲流的即时效应较为显著(图 2)。首先，对甲流而言，在暴发当天，效应随着  $\text{NO}_2$  浓度的变化接近于线性的增长；滞后 3 d 时，效应达到最强，RR 最大浓度阈值位于  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  附近；随着滞后日的延长，在滞后 6 d 时，效应逐渐消失(图 3)。

与甲流相比，乙流的即时效应不显著；滞后 3 d 时，高浓度的 NO<sub>2</sub> 有微弱的影响；滞后 6 d 时，在低浓度处曲线有所增加，可能是模型不稳定和数据样本量较少导致的(图 3)。



**Figure 2.** The lag effect of NO<sub>2</sub> on outbreak risk of (a) influenza A and (b) influenza B  
**图 2.** NO<sub>2</sub> 对(a)甲流和(b)乙流暴发疫情的滞后关联性



**Figure 3.** The association between NO<sub>2</sub> and risk of influenza subtypes on typical lag days  
**图 3.** 在典型滞后日 NO<sub>2</sub> 与流感亚型风险的关联性

表 2 所示为选取的 NO<sub>2</sub> 典型百分数(第 25, 50, 75, 95 百分位数)在典型滞后日(滞后 0、3、6 d)时的相对危险度。结果显示，在短期滞后时，高浓度的 NO<sub>2</sub> 对甲流的暴发有显著的影响。暴发当天时，68.51 µg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>)的 NO<sub>2</sub> 浓度相关联的 RR 可达 3.04 (95% CI: 2.07~4.48)；而 NO<sub>2</sub> 对乙流暴发风险的影响不显著，例如，滞后 3 d 时，68.51 µg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>)浓度的 NO<sub>2</sub> 的 RR 为 1.17 (95% CI: 0.96, 1.41)。

**Table 2.** Risk of influenza outbreak with 95% confidence intervals for typical concentrations of NO<sub>2</sub>  
**表 2.** NO<sub>2</sub> 典型浓度下流感暴发风险及其 95%置信区间

		Lag 0 d	Lag 3 d	Lag 6 d	
NO <sub>2</sub>	P <sub>25</sub>	Flu A	0.37 (0.27, 0.49)	0.21 (0.14, 0.30)	0.56 (0.43, 0.74)
		Flu B	0.77 (0.64, 0.09)	1.07 (0.96, 1.18)	<b>1.21 (1.08, 1.36)*</b>
	P <sub>50</sub>	Flu A	0.78 (0.71, 0.86)	0.65 (0.57, 0.75)	0.94 (0.84, 1.04)
		Flu B	1.00 (0.93, 1.07)	1.04 (0.99, 1.09)	0.87 (0.81, 0.94)

Continued

P <sub>75</sub>	Flu A	<b>1.37 (1.18, 1.59)*</b>	<b>1.59 (1.34, 1.88)*</b>	1.05(0.90, 1.21)
	Flu B	0.96 (0.87, 1.06)	0.96 (0.90, 1.03)	0.87(0.81, 0.94)
P <sub>95</sub>	Flu A	<b>3.04 (2.07, 4.48)*</b>	<b>1.68 (1.13, 2.49)*</b>	1.39(0.92, 2.11)
	Flu B	0.79 (0.59, 1.06)	1.17 (0.96, 1.41)	0.75(0.62, 0.91)

注: \*表示 RR 通过了显著性水平 95%的显著性检验。

### 3.2.2. SO<sub>2</sub> 对流感暴发的影响

图 4 与图 5 展示了在冷季 SO<sub>2</sub> 与两种流感的滞后关联性及在典型滞后日(0 d、4 d、8 d)的切片图。图 4 显示 SO<sub>2</sub> 对甲流的影响强于乙流。首先, 对于甲型来说, 随着浓度增加, 影响较显著。滞后 0 d 时, RR 最高, SO<sub>2</sub> 效应显著的浓度阈值约为 13 μg/m<sup>3</sup>。滞后 4 d 时, 流感暴发显著增加, 随后下降; 滞后 8 d 时略有上升(图 4~5)。而 SO<sub>2</sub> 与乙流暴发风险的关联性总体较弱。在滞后日当天, 效应显著; 在滞后 4 d 时, 随着 SO<sub>2</sub> 浓度的升高, RR 近似呈线性增加, 高浓度时显著。滞后 8 d 时, RR 呈非线性增加, 影响不显著(图 5)。

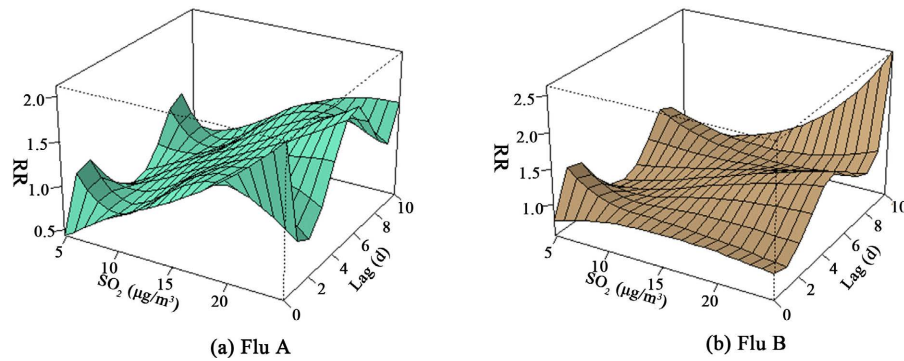


Figure 4. The lag effect of SO<sub>2</sub> on outbreak risk of (a) influenza A and (b) influenza B

图 4. SO<sub>2</sub> 与(a)甲流和(b)乙流暴发风险的滞后关联性

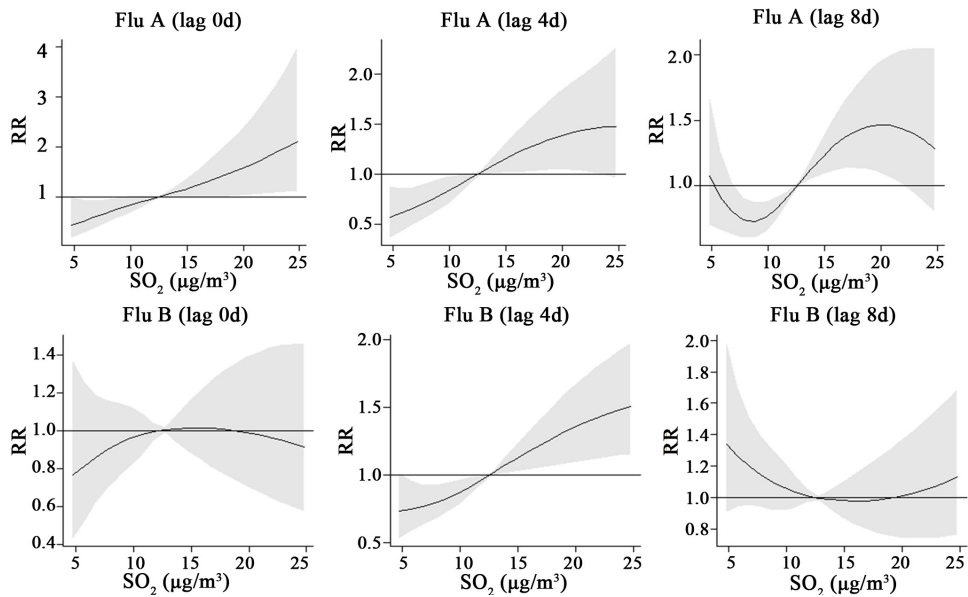


Figure 5. The association between SO<sub>2</sub> and risk of influenza subtypes on typical lag days

图 5. 在典型滞后日 SO<sub>2</sub> 与流感亚型风险的关联性

表 3 所示为选取 SO<sub>2</sub> 典型百分数(第 25, 50, 75, 95 百分位数)在典型滞后日(滞后 0、4、8 d)时的相对危险度。在滞后 4 d 时, 高浓度的 SO<sub>2</sub> 通过了显著性检验, 且 SO<sub>2</sub> 对甲流的暴发影响更大。例如, 滞后 4 d 时, 21.77 μg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>)的 SO<sub>2</sub> 的 RR 可达 1.44 (95% CI: 1.03~2.00)。

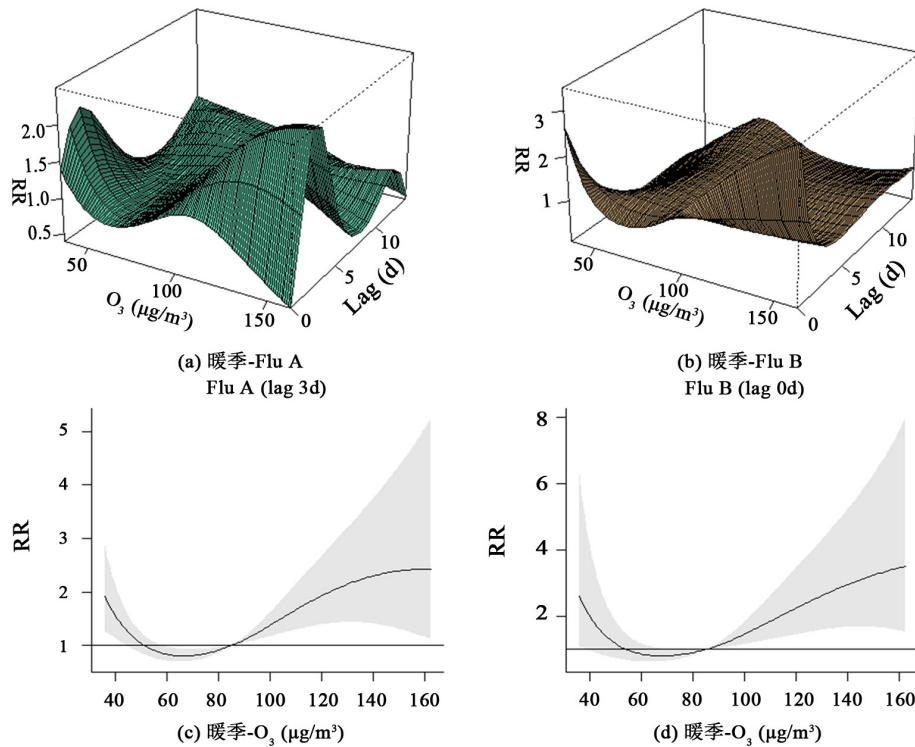
**Table 3.** Risk of influenza outbreak with 95% confidence intervals for typical concentrations of SO<sub>2</sub>  
**表 3.** SO<sub>2</sub> 典型浓度下流感暴发风险及其 95% 置信区间

RR		Lag 0 d	Lag 4 d	Lag 8 d	
SO <sub>2</sub>	P <sub>25</sub>	Flu A	0.67 (0.48, 0.95)	0.71 (0.55, 0.90)	0.74 (0.61, 0.91)
		Flu B	0.90 (0.70, 1.16)	0.77 (0.67, 0.93)	1.14 (0.94, 1.39)
	P <sub>50</sub>	Flu A	0.89 (0.78, 1.02)	0.88 (0.79, 0.99)	0.83 (0.75, 0.92)
		Flu B	0.98 (0.88, 1.09)	0.91 (0.84, 0.98)	1.03 (0.94, 1.14)
	P <sub>75</sub>	Flu A	1.15 (0.98, 1.34)	<b>1.14 (1.01, 1.28)*</b>	<b>1.22 (1.09, 2.03)*</b>
		Flu B	1.01 (0.89, 1.15)	<b>1.12 (1.03, 1.21)*</b>	0.98 (0.87, 1.10)
	P <sub>95</sub>	Flu A	<b>1.76 (1.08, 2.88)*</b>	<b>1.44 (1.03, 2.00)*</b>	<b>1.44 (1.02, 2.03)*</b>
		Flu B	0.97 (0.65, 1.44)	<b>1.45 (1.12, 1.80)*</b>	1.05 (0.74, 1.48)

注: \* 表示 RR 通过了显著性水平 95% 的显著性检验。

### 3.2.3. O<sub>3</sub> 对流感暴发的影响

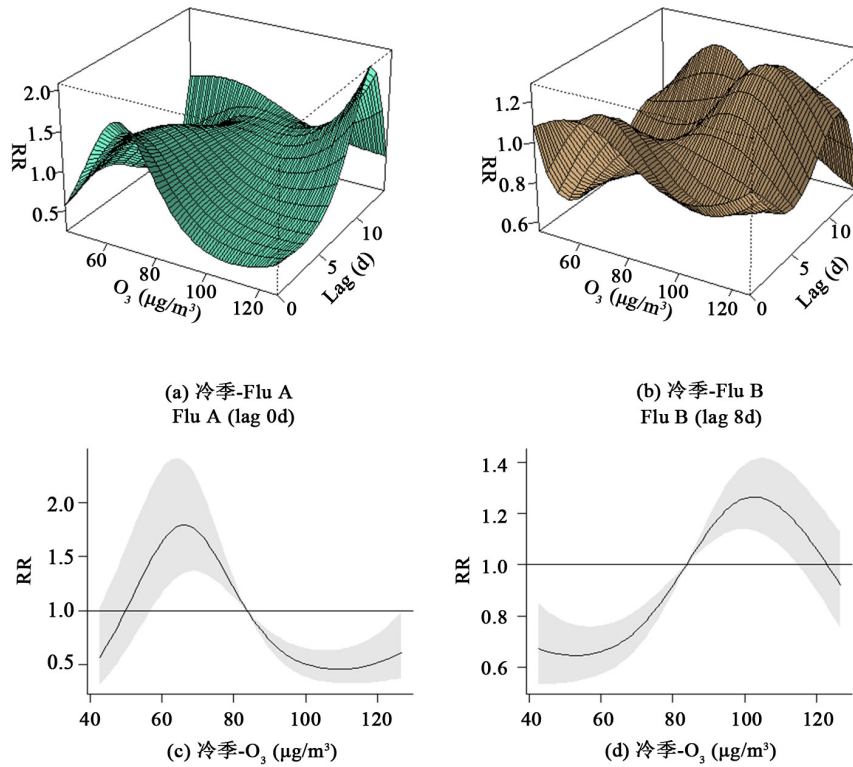
图 6 展示了在暖季 O<sub>3</sub> 与两种流感的滞后关联性(图 6(a)~(b))及在最强滞后日的切片图(图 6(c)~(d))。整体来说, 在暖季 O<sub>3</sub> 对流感暴发存在短期滞后影响(图 6(a)~(b))。滞后 3 d 时, 于甲流而言, 较高浓度时其滞后效应显著; 于乙流而言, 高浓度的 O<sub>3</sub> 会显著的影响当日发病率。在最强滞后日时, O<sub>3</sub> 对于两种亚型流感的效应显著的浓度阈值均为 85 μg/m<sup>3</sup> (图 6(c)~(d))。



**Figure 6.** The lag effect of O<sub>3</sub> on outbreaks of influenza (a~b) and the strongest association (c~d) in the warm season  
**图 6.** 暖季 O<sub>3</sub> 对流感的三维滞后效应(a~b)及最强滞后日的关联性(c~d)



图 7 反映了在冷季 O<sub>3</sub> 对两种流感的滞后关联性(a~b)及最强滞后日的切片图(c~d)。相较于暖季而言，O<sub>3</sub> 在冷季的影响不显著。对于甲流而言，滞后 0 d，O<sub>3</sub> 浓度较低时 RR 较大，可能是模型不稳定导致；对于乙流而言，在滞后 8 d 时，100 μg/m<sup>3</sup>附近出现 RR 最大值。



**Figure 7.** The lag effect of O<sub>3</sub> on outbreaks of influenza (a~b) and the strongest association (c~d) in the cold season  
**图 7.** 冷季 O<sub>3</sub> 对流感的三维滞后效应(a~b)及最强滞后日的关联性(c~d)

表 4 所示为选取 O<sub>3</sub> 典型百分数(第 25, 50, 75, 95 百分位数)在最强滞后日(暖季: 滞后 0 d、3 d; 冷季: 滞后 0 d、8 d)时的相对危险度。在暖季，高浓度的 O<sub>3</sub> 对流感的暴发具有显著的短期滞后影响。其中，O<sub>3</sub> 对甲流的影响在滞后 3 d 时最大，162.12 μg/m<sup>3</sup> (P<sub>95</sub>)的 O<sub>3</sub> 的 RR 为 2.42 (95% CI: 1.12~5.42)。而冷季效应不显著。

**Table 4.** Risk of influenza outbreak with 95% confidence intervals for each typical concentration of O<sub>3</sub>  
**表 4.** O<sub>3</sub> 各典型浓度下流感暴发风险及其 95%置信区间

	RR	暖季		冷季	
		Lag 0 d	Lag 3 d	Lag 0 d	Lag 8 d
P <sub>25</sub>	Flu A	0.81 (0.61, 1.08)	0.83 (0.70, 0.98)	<b>1.66 (1.18, 2.33)*</b>	0.97 (0.71, 1.33)
	Flu B	0.86 (0.62, 1.18)	1.02 (0.80, 1.30)	1.16 (0.92, 1.46)	0.66 (0.58, 0.76)
P <sub>50</sub>	Flu A	0.92 (0.83, 1.01)	0.89 (0.84, 0.95)	<b>1.23 (1.14, 1.34)*</b>	1.07 (0.99, 1.16)
	Flu B	0.88 (0.80, 0.98)	1.04 (0.95, 1.13)	1.04 (0.99, 1.10)	0.91 (0.88, 0.94)
P <sub>75</sub>	Flu A	1.21 (0.97, 1.51)	<b>1.41 (1.18, 1.67)*</b>	0.49 (0.37, 0.64)	0.81 (0.63, 1.03)
	Flu B	<b>1.49 (1.17, 1.92)*</b>	0.88 (0.70, 1.10)	0.90 (0.76, 1.08)	<b>1.26 (1.14, 1.40)*</b>
P <sub>95</sub>	Flu A	0.40 (0.16, 0.99)	<b>2.42 (1.12, 5.24)*</b>	0.61 (0.38, 0.99)	1.22 (0.80, 1.85)
	Flu B	<b>3.5 (1.54, 7.96)*</b>	0.88 (0.48, 1.72)	1.04 (0.76, 1.13)	0.92 (0.76, 1.13)

注: \* 表示 RR 通过了显著性水平 95%的显著性检验。

## 4. 结果与结论

### 4.1. 结果

本研究对深圳全市 2013 年 5 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的流感确诊病例、主要气象因子、气态污染物的数据进行了分析, 通过非线性时间序列模型的建立, 重点分析了冷季中 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 对流感暴发的影响, 以及区分冷、暖季后, O<sub>3</sub> 对流感暴发的影响。得到以下结论:

- 1) 高浓度 NO<sub>2</sub> 与甲流发病率呈正相关关系, 这一结果与已有研究[29]一致。
- 2) 高浓度 SO<sub>2</sub> 与甲型流感暴发的短期滞后关联性更大, 这与济宁市的相关研究[30]类似。
- 3) 暖季高浓度的 O<sub>3</sub> 对流感暴发存在显著影响。甲流在滞后 3 d 效果显著, 乙流则存在较强的即时效应; 而冷季时 O<sub>3</sub> 对流感的暴发影响不大。这一结论与宜昌市相关研究[31]类似。

### 4.2. 讨论

本研究利用了分布-滞后模型, 分析了深圳市气态污染物的浓度与流感暴发风险的影响, 讨论了三种污染物在季节上对流感暴发影响的差异, 为后续深圳市环境健康方面的研究提供了新的思路。另外, 相关部门应该加强流感的宣传力度, 提高居民的防范意识和疫苗接种率。

本研究也存在一定的局限性。一方面, 本文分析的数据样本仅为 2013 年 5 月 1 日~2015 年 12 月 31 日, 样本数量相对较少, 且气态污染物的浓度为环境监测所得到的资料, 不能够完全代表个体暴露水平, 因此对结果的准确性具有一定的影响; 另一方面, 本研究考虑的气象因素为日平均温度和相对湿度, 但其他气象因素如日照时数、风速等以及污染物之间的交互作用的混杂因素也可能影响流感的传播。在未来的研究中, 还应该扩大数据时间年限的同时, 综合考虑多种气象要素以及各污染物之间的交互作用, 以更好地探究大气污染状况与流感暴发或传播的关系。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(42205185); 成都信息工程大学教育教学研究与改革项目(JYJG2023066); 成都信息工程大学大学生创新创业项目(202210621007)。

## 参考文献

- [1] 杨娟, 赖圣杰, 余宏杰. 感染性疾病流行现状、防控挑战与应对[J]. 中华疾病控制杂志, 2017, 21(7): 647-649, 674. <https://doi.org/10.16462/j.cnki.zhjbkz.2017.07.001>
- [2] Feng, L., Feng, S., Chen, T., Yang, J., Lau, Y.C., Peng, Z., Li, L., et al. (2020) Burden of Influenza-Associated Outpatient Influenza-Like Illness Consultations in China, 2006-2015: A Population-Based Study. *Influenza and Other Respiratory Viruses*, **14**, 162-172. <https://doi.org/10.1111/irv.12711>
- [3] Javanian, M., Barary, M., Ghebrehewet, S., Koppolu, V., Vasigala, V. and Ebrahimpour, S. (2021) A Brief Review of Influenza Virus Infection. *Journal of Medical Virology*, **93**, 4638-4646. <https://doi.org/10.1002/jmv.26990>
- [4] 逯建华, 程小雯, 房师松, 等. 深圳市 2005-2008 年流感样病例暴发疫情特征分析[J]. 中国热带医学, 2009, 9(11): 2102-2103.
- [5] 陆剑云, 练桂雄, 陈文华, 陈艺韵, 李魁彪, 等. 2009 年广州市 417 起流感样病例暴发疫情分析[J]. 华南预防医学, 2011, 37(1): 29-30.
- [6] Hong, K., Sohn, S. and Chun, B.C. (2019) Estimating Influenza-Associated Mortality in Korea: The 2009-2016 Seasons. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, **52**, 308-315. <https://doi.org/10.3961/jpmph.19.156>
- [7] Dai, Q., Ma, W., Huang, H., Xu, K., Qi, X., Yu, H., Deng, F., Bao, C. and Huo, X. (2018) The Effect of Ambient Temperature on the Activity of Influenza and Influenza like Illness in Jiangsu Province, China. *Science of the Total Environment*, **645**, 684-691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.065>
- [8] 张惶惶, 冯录召, 赖圣杰, 马礼兵, 张婷, 杨津, 王晴, 杨维中. 流感疫情早期预警模型的研究进展[J]. 中华预防

医学杂志, 2022, 56(11): 1576-1583.

- [9] 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5131-5142.
- [10] Wang, D., Lei, H., Wang, D., Shu, Y. and Xiao, S. (2023) Association between Temperature and Influenza Activity across Different Regions of China during 2010-2017. *Viruses*, **15**, Article No. 594. <https://doi.org/10.3390/v15030594>
- [11] 马盼, 王馨梓, 张莉, 等. 深圳流感发病的气象诱因及预测建模研究[J]. 气象学报, 2022, 80(3): 421-432.
- [12] 郭貔, 李克. 香港 1997-2008 年甲型流感季节性波动与气候因素的相关性分析[J]. 中华流行病学杂志, 2011(10): 1005-1008.
- [13] Li, Y.P. (2018) Impact of Weather Factors on Influenza Hospitalization across Different Age Groups in Subtropical Hong Kong. *International Journal of Biometeorology*, **62**, 1615-1624. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1561-z>
- [14] Wang, X.L., Yang, L., He, D.H., Chiu, A.P., Chan, K.H., Chan, K.P., Zhou, M., Wong, C.M., Guo, Q. and Hu, W. (2017) Different Responses of Influenza Epidemic to Weather Factors among Shanghai, Hong Kong, and British Columbia. *International Journal of Biometeorology*, **61**, 1043-1053. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1284-y>
- [15] Abolhasani, R., Araghi, F., Tabary, M., Aryannejad, A., Mashinchi, B. and Robati, R.M. (2021) The Impact of Air Pollution on Skin and Related Disorders: A Comprehensive Review. *Dermatologic Therapy*, **34**, e14840. <https://doi.org/10.1111/dth.14840>
- [16] Guarneri, M. and Balmes, J.R. (2014) Outdoor Air Pollution and Asthma. *The Lancet*, **383**, 1581-1592. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60617-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60617-6)
- [17] Münzel, T., Gori, T., Al-Kindi, S., Deanfield, J., Lelieveld, J., Daiber, A. and Rajagopalan, S. (2018) Effects of Gaseous and Solid Constituents of Air Pollution on Endothelial Function. *European Heart Journal*, **39**, 3543-3550. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy481>
- [18] Ma, P., Zhou, N., Wang, X., Zhang, Y., Tang, X., Yang, Y., Ma, X. and Wang, S. (2023) Stronger Susceptibilities to Air Pollutants of Influenza A than B Were Identified in Subtropical Shenzhen, China. *Environmental Research*, **219**, Article ID: 115100. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115100>
- [19] Liang, Z.F., Chen, W.B., Zheng, J. and Lu, T.J. (2019) Simulation of the Distribution of Main Atmospheric Pollutants and the Influence of Land Use on Them in Central Urban Area of Nanchang City, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **30**, 1005-1014.
- [20] Zhang, Y., Wang, S., Feng, Z. and Song, Y. (2022) Influenza Incidence and Air Pollution: Findings from a Four-Year Surveillance Study of Prefecture-Level Cities in China. *Frontiers in Public Health*, **10**, Article ID: 1071229. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1071229>
- [21] Song, Y., Zhang, Y., Wang, T., Qian, S. and Wang, S. (2021) Spatio-Temporal Differentiation in the Incidence of Influenza and Its Relationship with Air Pollution in China from 2004 to 2017. *Chinese Geographical Science*, **31**, 815-828. <https://doi.org/10.1007/s11769-021-1228-2>
- [22] Yang, J., Yang, Z., Qi, L., Li, M., Liu, D., Liu, X., Tong, S., Sun, Q., Feng, L., Ou, C.Q. and Liu, Q. (2023) Influence of Air Pollution on Influenza-Like Illness in China: A Nationwide Time-Series Analysis. *EBioMedicine*, **87**, Article ID: 104421. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104421>
- [23] 赵秀玲, 李伟, 王伟民, 韩立建, 周伟奇. 我国典型城市空气质量演变及其调控——以深圳市 2000-2017 年为例[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5894-5903.
- [24] 深圳市气象局. 深圳市气候概况及四季特征[EB/OL]. <http://weather.sz.gov.cn>, 2022-03-31.
- [25] Zhang, T.P., Wang, L.J., Wang, S., Wang, P., Zhou, X.H., Wang, L., Yang, C.M. and Li, X.M. (2022) Exposure to Ambient Gaseous Pollutant and Daily Hospitalizations for Sjögren's Syndrome in Hefei: A Time-Series Study. *Frontiers in Immunology*, **13**, Article ID: 1028893. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.1028893>
- [26] 康敏, 谭小华, 杨宇威, 武婕, 郑慧贞, 宋铁. 广东省 2017-2018 年冬季流感流行特征研究[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 39(8): 1071-1076.
- [27] 谢祖欣, 冯宏芳, 林文, 张福旺, 李丹, 陈彬彬, 蒋永成. 气象条件对福州市夏季臭氧(O<sub>3</sub>)浓度的影响研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2251-2261.
- [28] 景双林. 数据驱动的几类多因素影响流感建模与分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020. <https://doi.org/10.27206/d.cnki.ggsgu.2020.000470>
- [29] Li, H., Ge, M. and Wang, C. (2023) Spatio-Temporal Evolution Patterns of Influenza Incidence and Its Nonlinear Spatial Correlation with Environmental Pollutants in China. *BMC Public Health*, **23**, Article No. 1685. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-16646-z>
- [30] Li, P., Yu, T.Z., Ge, K.F., Guo, R.R., Lin, Y.H., Zhang, J. and Wang, W.J. (2021) Impact of Air Pollutants on Influen-

za Incidence in Jining City from 2009 to 2017 and Its Early Warning. *Journal of Jining Medical University*, **44**, 153-157.

- [31] 廖青, 胡雪姣, 薛琦, 王蕾, 刘建华, 王思嘉, 宫雅琪, 聂绍发. 宜昌市大气污染物对流感样病例的短期效应[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(10): 879-884, 891. <https://doi.org/10.13213/j.cnki.jeom.2018.18182>