

· 专题报道 —— 关注空气质量，保护个人健康 ·

基于增强回归树模型评估宁夏回族自治区气象因素和大气污染物对流行性腮腺炎发病影响

刘祥龙^{1,2}, 陈琳琳^{1,2}, 余佳玉^{1,2}, 龚瑞³, 陈耀庚⁴, 赵瑜^{1,2}

1. 宁夏医科大学公共卫生学院流行病和卫生统计学系, 银川 750004;
2. 宁夏环境因素与慢性病控制重点实验室, 银川 750004;
3. 宁夏疾病预防控制中心传染病与预防控制科, 银川 750004;
4. 宁夏医科大学医学信息与工程学院, 银川 750004

通信作者: 赵瑜, E-mail: zhaoyu@nxmu.edu.cn

【摘要】目的 评估宁夏回族自治区气象因素和大气污染物对流行性腮腺炎发病的影响, 为流行性腮腺炎的早期预防和反应系统的建设提供参考依据。**方法** 收集宁夏回族自治区 2015 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日流行性腮腺炎的发病数据以及每日气象和大气污染物数据, 应用增强回归树(BRT)模型来确定最能解释流行性腮腺炎新发病例的气象因素和大气污染物的最佳滞后, 并评估该地区气象因素和大气污染物对流行性腮腺炎发病的影响。**结果** 宁夏回族自治区 2015—2019 年流行性腮腺炎新发病例数为 6 660 例, 其中男性 3 936 例(59.1%), 女性 2 724 例(40.9%); 年龄 < 4 岁 2 230 例(33.5%), 4~15 岁 3 537 例(53.1%), > 15 岁 893 例(13.4%)。BRT 模型验证结果显示, 滞后 7 d 时模型具有最大的训练集受试者工作特征曲线下面积(AUC)值为 0.915、测试集 AUC 值为 0.717、标准误为 0.027, 宁夏回族自治区 1 周前气象因素和大气污染物对流行性腮腺炎新发病例变化的解释作用最大。BRT 模型分析结果显示, 日均气温对流行性腮腺炎发病的相对重要性最大为 26.36%, 其次为日均相对湿度, 相对重要性为 13.90%; 日均气温 -3℃~23℃ 和日均相对湿度 > 40% 为流行性腮腺炎发病风险增加的原因; 较高的日均气压和日均风速对流行性腮腺炎的发病具有抑制作用; 空气中臭氧(O₃)浓度较低时对流行性腮腺炎的发病具有促进作用; 空气中二氧化硫(SO₂)浓度 < 100 μg/m³ 时对流行性腮腺炎的发病具有促进作用, 浓度 ≥ 100 μg/m³ 则转变为抑制作用; 较低浓度的一氧化碳(CO)、二氧化氮(NO₂)、细颗粒物(PM_{2.5})和可吸入颗粒物(PM₁₀)均对流行性腮腺炎的发病具有促进作用。**结论** 宁夏回族自治区日均气温、日均相对湿度、日均气压、日均风速等气象因素以及 O₃、SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 等大气污染物在一定范围内对流行性腮腺炎的发病均具有显著促进作用。

【关键词】 流行性腮腺炎; 发病; 气象因素; 大气污染物; 影响; 增强回归树(BRT)模型; 评估

Associations of meteorological factors and ambient air pollutants with mumps incidence in Ningxia Hui Autonomous Region: boosted regression tree model analysis

LIU Xianglong^{1,2}, CHEN Linlin^{1,2}, YU Jiayu^{1,2}, GONG Rui³, CHEN Yaogeng⁴, ZHAO Yu^{1,2} (1. Institute of Epidemiology and Statistics, School of Public Health, Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, China; 2. Ningxia Key Laboratory of Environmental Factors and Chronic Disease Control, Yinchuan 750004, China; 3. Department of Infectious Diseases and Control, Ningxia Center for Disease Control and Prevention, Yinchuan 750004, China; 4. School of Medical Information and Engineering, Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, China)

Corresponding author: ZHAO Yu, E-mail: zhaoyu@nxmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To evaluate the associations of meteorological factors and ambient air pollutants with the incidence of mumps in Ningxia Hui Autonomous Region, and to provide a reference for the development of early warning and response systems for mumps epidemic. **Methods** Data on the daily number of mumps cases in Ningxia Hui Autonomous Region from 2015 to 2019 were obtained from the Notifiable Infectious Disease Surveillance System of the region, and data on meteorological factors (daily mean temperature/relative humidity/atmospheric pressure/wind speed) and air pollutants (daily concentrations of ozone, [O₃], sulfur dioxide [SO₂], carbon monoxide [CO], nitrogen dioxide [NO₂], and particulate matter with aerodynamic diameter < 2.5/10 μm [PM_{2.5}/PM₁₀]) for the same period were obtained from the National Meteorological Science Data Center. A boosted regression tree (BRT) model was used to determine the optimal lag of meteorological factors and air pollutants that best explained mumps cases and to evaluate the associations of meteorological factors and air pollutants with the daily number of mumps cases in the region. **Results** A total of 6 660 new cases of mumps were reported in the region during the period, including 3 936 males (59.1%) and 2 724 females



(40.9%); 2 230 (33.5%) were aged less than 4 years, 3 537 (53.1%) were aged 4 – 15 years and 893 (13.4%) were aged > 15 years. The BRT model validation results showed that the model had the largest area under the receiver operating characteristic curve (AUC) value of 0.915 for the training set and 0.717 for the test set at a lag of 7 days, with a standard error of 0.027, indicating that in the region, meteorological factors and air pollutants one week prior had the greatest explanatory power for changes in the number of new mumps cases. BRT model analysis showed that daily mean temperature had the greatest relative importance on mumps incidence at 26.36%, followed by daily mean relative humidity at 13.90%. Daily mean temperatures of $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ and daily mean relative humidity > 40% were risk factors for mumps incidence. Higher daily mean barometric pressure and daily mean wind speed had an inhibitory effect on mumps incidence. Lower ambient O_3 concentrations promoted mumps incidence; ambient SO_2 concentrations < $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ promoted mumps incidence, whereas SO_2 concentrations $\geq 100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ had an inhibitory effect. Lower concentrations of CO, NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} all promoted mumps incidence. **Conclusion** Daily mean temperature/relative humidity/air pressure/wind speed, as well as ambient air O_3 , SO_2 , CO, NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} , all significantly contributed to the incidence of mumps in Ningxia Hui Autonomous Region.

【Keywords】 mumps; incidence; meteorological factors; air pollutants; impact; boosted regression tree model; assessment

流行性腮腺炎是一种常见的儿童传染病，由腮腺炎病毒引起，传染性强，可以通过飞沫和接触传播^[1]，是中国主要公共卫生问题之一，给儿童青少年带来严重的危害^[2]。近年来流行性腮腺炎病例在全球范围内死灰复燃^[3]，我国流行性腮腺炎病例数高峰呈现出明显的季节性特征^[4]。目前大多研究均集中于气象因素在流行性腮腺炎发病中的作用^[2, 4]，但有关大气污染物对流行性腮腺炎发病影响的研究较少。多项研究表明，接触大气污染物会加速呼吸道病毒对机体的感染^[5-8]，因此构建基于气象因素和大气污染物的流行性腮腺炎发病预测模型至关重要。由于气象因素和大气污染物往往对传染病的发生产生非线性影响^[9-10]，且相互作用是气象因素之间的一个常见问题^[11]，此外气象因素和大气污染物对健康的影响可能存在一定的滞后效应^[9, 12]，因此非线性关系、延迟效应和共线性问题是这种天气-健康关系探索中实现稳健和准确估计的关键问题。增强回归树(boosted regression trees, BRT)模型是一种新发展起来的方法，它结合了传统回归模型和机器学习方法，可拟合复杂的非线性关系，该模型可用于识别最具解释力的变量，指示最佳条件并预测新情况^[13]。为评估宁夏回族自治区气象因素和大气污染物对流行性腮腺炎发病的影响，为流行性腮腺炎的早期预防和反应系统的建设提供参考依据，本研究收集宁夏回族自治区 2015 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日流行性腮腺炎的发病数据以及每日气象和大气污染物数据，应用 BRT 模型来确定最能解释流行性腮腺炎新发病例的气象因素和大气污染物的最佳滞后，并评估该地区气象因素和大气污染物对流行性腮腺炎发病的影响。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源 本研究收集 2015 年 1 月 1 日—

2019 年 12 月 31 日的相关数据。其中流行性腮腺炎发病数据来源于宁夏回族自治区法定传染病监测系统，宁夏回族自治区同期每日气象数据和大气污染物数据均来源于国家气象科学数据中心，其中气象因素包括日均气温、日均相对湿度、日均气压、日均风速和日均降水量共 5 个指标，大气污染物包括臭氧(ozone, O_3)、二氧化硫(sulfur dioxide, SO_2)、一氧化碳(carbon monoxide, CO)、二氧化氮(nitrogen dioxide, NO_2)、细颗粒物(2.5-micrometer particulate matter, $\text{PM}_{2.5}$)和可吸入颗粒物(inhalable particles, 10-micrometer particulate matter, PM_{10})共 6 个指标。

1.2 统计分析 应用 R 4.3.0 软件进行统计分析。采用泊松分布的 BRT 模型分析气象因素和大气污染物对宁夏回族自治区流行性腮腺炎的影响，该模型是逻辑回归的一种形式，它对 $y = 1$ (存在新发病例)时协变量 x 出现的概率进行建模: $\text{logit } P(y = 1|x) = \beta x^2$ ^[13]。BRT 模型有 3 个参数需要调整，分别为袋分数、学习率和树的复杂度，默认的袋分数为 0.5，树的复杂度为 5，根据经验需要至少 1 000 棵树来拟合最佳模型^[13]。本研究将每天是否新发流行性腮腺炎病例作为结局变量，根据年龄和性别分为男性、女性 < 4、4~15 和 > 15 岁 5 组，将是否为节假日、日均气温、日均相对湿度、日均气压、日均风速、日均降水量、 O_3 、 SO_2 、CO、 NO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 共 12 个变量纳入模型。有研究表明流行性腮腺炎的最长潜伏期为 24 d，中位数潜伏期为 19 d^[1]，故本研究 BRT 模型滞后选择分别为 0、7、10、14、18、19、22 和 26 d。通过训练集及测试集受试者工作特征(receiver operating characteristic curve, ROC)曲线计算曲线下面积(area under the curve, AUC)，AUC 值越接近 1，表示模型性能越好，从而确定最佳滞后。BRT 模型逐步纳入、排除变量，持续到预测偏差的平均变化超过原始计算标准误差时建立最优模型^[13]。检验水准为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 宁夏回族自治区流行性腮腺炎发病以及气象和大气污染物因素基本特征 宁夏回族自治区流行性腮腺炎新发病例数据收集时间为 2015 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日, 共计 1 826 d。新发病例总数为 6 660 例, 其中男性 3 936 例(59.1%), 女性 2 724 例(40.9%); < 4 岁 2 230 例(33.5%), 4~15 岁 3 537 例(53.1%), > 15 岁 893 例(13.4%)。气象因素中日均气温为 0.80 °C~20.22 °C, 日均气温中位数为 11.69 °C; 日均相对湿度为 38.51%~60.01%, 日均相对湿度中位数为 48.53%; 日均气压为 868.84~880.03 hPa, 日均气压中位数为 874.10 hPa; 日均风速为 1.66~2.64 m/s, 日均风速中位数为 2.11 m/s; 日均降水量为 0.00~0.10 mm, 日均降水量中位数为 0.00 mm。大气污染物中 O₃ 浓度为 67.00~120.40 μg/m³, O₃ 浓度中位数为 93.60 μg/m³; SO₂ 浓度为 13.80~37.00 μg/m³, SO₂ 浓度中位数为 21.20 μg/m³; CO 浓度为 0.64~0.98 mg/m³, CO 浓度中位数为 0.76 mg/m³; NO₂ 浓度为 20.60~35.80 μg/m³, NO₂ 浓度中位数为 26.60 μg/m³; PM_{2.5} 浓度为 25.40~50.80 μg/m³, PM_{2.5} 浓度中位数为 35.00 μg/m³; PM₁₀ 浓度为 60.80~118.50 μg/m³, PM₁₀ 浓度中位数为 83.60 μg/m³。

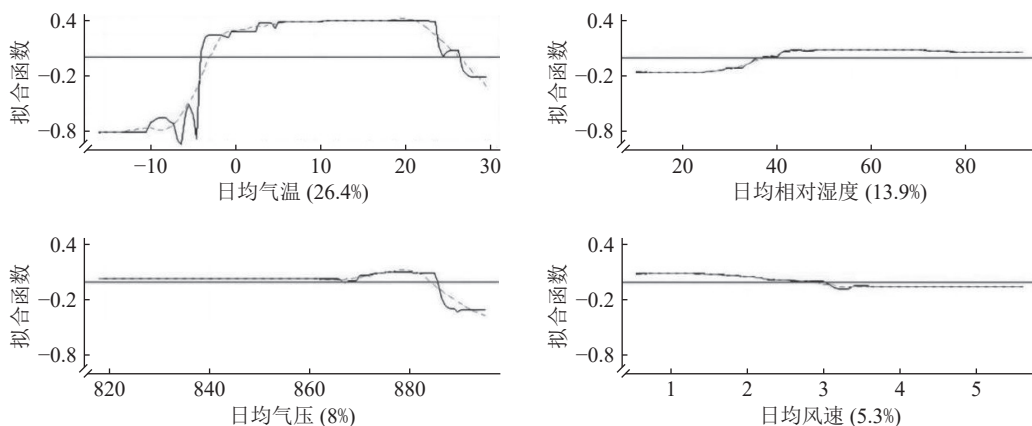
2.2 BRT 最优模型构建 当学习率为 0.001 时, 训练集和测试集受试者工作特征曲线下面积(area under curve, AUC)最大, 树的数量 > 1 000。BRT 模型验证结果显示, 滞后选择为 7 d 时, 模型具有最大的训练集 AUC 值为 0.915, 测试集 AUC 值为 0.717, 标准误为 0.027; 模型优化后, 最终将日均气温、日均相对湿度、日均气压、日均风速、O₃、SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 共 10 个变量纳入模型, 该模型的训练集 AUC 值为 0.918, 测试集 AUC 值为 0.702, 标准误为 0.015。

2.3 宁夏回族自治区气象因素对流行性腮腺炎发病的影响(表 1, 图 1) BRT 模型分析结果显示, 在总人群中, 日均气温对宁夏回族自治区流行性腮腺炎发病的相对重要性最大为 26.36%, 其中日均气温为 -3 °C~23 °C 是流行性腮腺炎发病风险增加的原因, 当超出 -3 °C~23 °C 区间时日均气温则可减少流行性腮腺炎的发病风险; 其次为日均相对湿度, 对宁夏回族自治区流行性腮腺炎相对重要性为 13.90%, 当日均相对湿度 > 40% 时可增加流行性腮腺炎的发病风险; 较高的日均气压和日均风速对流行性腮腺炎的发病具有抑制作用, 而较低的日均风速则对流行性腮腺炎发病的发病具有促进作用。不同性别人群中, 日均相对湿度和日均气压对男性人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大, 日均气温和日均风速对女性人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大; 不同年龄人群中, 日均气温对 0~4 岁人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大, 日均相对湿度对 5~15 岁人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大, 日均气压和日均风速对 > 15 岁人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大。

表 1 宁夏回族自治区气象因素对流行性腮腺炎发病的相对重要性(%)

Table 1 Relative importance (%) of daily mean temperature/relative humidity/atmospheric pressure/wind speed on the daily number of mumps cases in total, males, females, and three age groups of the population in Ningxia Hui Autonomous Region, 2015 - 2019: boosted regression tree model analysis

组别	日均气温	日均相对湿度	日均气压	日均风速
总人群	26.36	13.90	7.95	5.32
男性	24.80	12.56	12.01	6.78
女性	28.96	11.25	11.41	10.51
0~4岁	33.17	9.84	9.88	9.13
5~15岁	24.79	20.67	8.05	5.71
> 15岁	12.24	9.21	15.47	12.10



注: X轴为影响因素; Y轴为影响因素对结局的效应; 图中横线为正负向效应分界线; 图中曲线为拟合函数; 虚线为平滑后拟合函数。

图 1 宁夏回族自治区气象因素对流行性腮腺炎发病的影响

Fig. 1 Associations of daily mean temperature/relative humidity/atmospheric pressure/wind speed (X-axes) with mumps incidence (Y-axes for logit (P) of mumps incidence) in the population of Ningxia Hui Autonomous Region, 2015 - 2019: boosted regression tree model analysis (The horizontal line indicates the boundary between positive and negative effects, The curve is the fitted function and the dashed line is the smoothed fitted function)

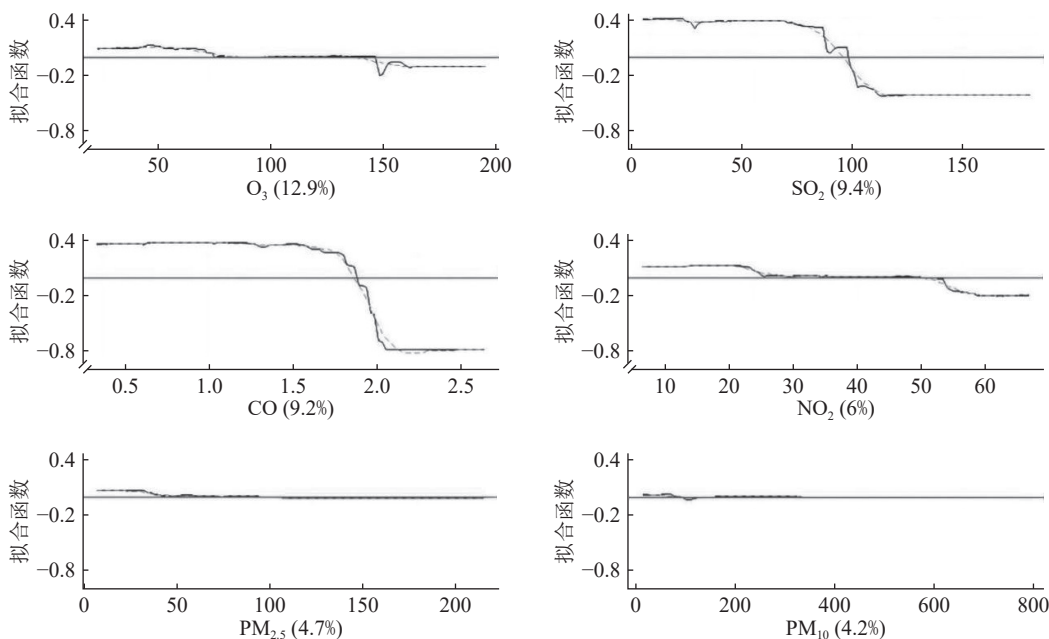
2.4 宁夏回族自治区大气污染物对流行性腮腺炎发病的影响(表 2, 图 2) BRT 模型分析结果显示, 在总人群中, O₃ 浓度对宁夏回族自治区流行性腮腺炎发病的相对重要性最大为 12.86%, 空气中 O₃ 浓度较低时对流行性腮腺炎的发病具有促进作用, 而浓度 > 150 μg/m³ 时对流行性腮腺炎的发病则具有抑制作用; 其次为 SO₂ 浓度, 对宁夏回族自治区流行性腮腺炎发病的相对重要性为 9.41%, 空气中 SO₂ 浓度 < 100 μg/m³ 时对流行性腮腺炎的发病具有促进作用, 但 SO₂ 浓度在 ≥ 100 μg/m³ 时对流行性腮腺炎的发病则具有抑制作用; 空气中 CO 浓度 < 1.5 mg/m³ 时对流行性腮腺炎的发病具有促进作用, 随着 CO 浓度的上升, 这种促进作用逐渐减弱, 当浓度 > 1.8 mg/m³

时对流行性腮腺炎的发病则具有抑制作用, 但浓度在 > 2.0 mg/m³ 后不再变化; 空气中较低的 NO₂ 浓度对流行性腮腺炎的发病具有促进作用, 而较高的浓度则对流行性腮腺炎的发病具有抑制作用; PM_{2.5} 和 PM₁₀ 在较低浓度时对流行性腮腺炎的发病仅具有微弱的促进作用。不同性别人群中, SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度对男性人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大, O₃ 和 NO₂ 浓度对女性人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大; 不同年龄人群中, NO₂ 浓度对 0~4 岁人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大, O₃、SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度对 > 15 岁人群流行性腮腺炎发病的相对重要性较大。

表 2 宁夏回族自治区大气污染物对流行性腮腺炎发病的相对重要性(%)

Table 2 Relative importance (%) of daily mean concentrations of O₃, SO₂, CO, NO₂, PM_{2.5}, and PM₁₀ on the daily number of mumps cases in total, males, females, and three age groups of the population in Ningxia Hui Autonomous Region, 2015 – 2019: boosted regression tree model analysis

组别	O ₃	SO ₂	CO	NO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
总人群	12.86	9.41	9.24	6.04	4.73	4.19
男性	5.59	10.35	4.72	5.30	4.70	9.46
女性	6.83	6.91	3.16	6.26	3.68	6.63
0~4岁	9.54	5.81	3.64	6.10	3.86	4.64
5~15岁	9.05	8.23	3.71	5.25	6.47	5.76
> 15岁	14.17	8.52	4.52	4.86	6.69	9.99



注: X轴为影响因素; Y轴为影响因素对结局的效应; 图中横线为正负向效应分界线; 图中曲线为拟合函数; 虚线为平滑后拟合函数。

图 2 宁夏回族自治区大气污染物对流行性腮腺炎发病的影响

Fig. 2 Associations of daily mean concentrations of O₃, SO₂, CO, NO₂, PM_{2.5}, and PM₁₀ (X-axes) with mumps incidence (Y-axes for logit (P) of mumps incidence) in the population of Ningxia Hui Autonomous Region, 2015 – 2019: boosted regression tree model analysis (The horizontal line indicates the boundary between positive and negative effects, The curve is the fitted function and the dashed line is the smoothed fitted function)

3 讨论

有研究表明,传染病的流行具有明显的季节性趋势,其机制可能与环境和易感人群行为的变化有关,尤其是呼吸道传染病,气象因素和大气污染物可能在其传播过程中发挥着重要作用^[14]。本研究利用 BRT 模型量化了气象因素和大气污染物对宁夏回族自治区流行性腮腺炎发病的影响。这些因素不仅会影响人类活动和易感性,而且还会对流行性腮腺炎病毒的活动和传播产生潜在影响。

本研究结果显示,日均气温是流行性腮腺炎发病的首要影响因素,气温可以直接影响病毒蛋白和基因的状态,是影响病毒存活的最重要因素。在中国其他城市,气温亦是影响流行性腮腺炎的最重要因素之一^[4, 15-16]。在较低或者较高的气温时,病毒的活性与人群的活动均受到影响,而在较温暖的月份,病毒和人类的活动均有所增加。此外,相对湿度亦会影响病毒的存活。山东省济宁市的一项研究发现,当滞后 14 d 的相对湿度 > 54% 时,相对湿度每增加 1%,流行性腮腺炎的超额风险增加 1.86%^[17];湖南省的一项研究发现流感发病与相对湿度呈正相关^[18]。福建省厦门市进行的研究表明,较高的气压对流感的发病具有抑制作用,较低的气压则对流感的发病具有促进作用^[19],与本研究中较高的日均气压对流行性腮腺炎的发病具有抑制作用的结果一致。

本研究结果显示, O₃ 浓度对宁夏回族自治区流行性腮腺炎发病的相对重要性最大为 12.86%,空气中 O₃ 浓度较低(在较低浓度范围内)时对流行性腮腺炎的发病具有促进作用,而浓度 > 150 μg/m³ 时对流行性腮腺炎的发病则具有抑制作用。一方面,有研究表明暴露于 O₃ 可增强炎症的敏感性^[20-21];另一方面, O₃ 对机体具有保护作用,可以发挥抗炎和抗氧化活性^[22],同时高浓度的 O₃ 可以阻止病毒和受体相结合^[23]。有流行病学证据显示颗粒物(particulate matter, PM)暴露会增大呼吸道感染风险,病毒颗粒会沉降到颗粒物表面在空气中停留足够长的时间以被易感宿主吸入呼吸道^[24-26]。本研究中 SO₂、NO₂ 和 CO 的作用与 O₃ 类似。其中, SO₂ 是具有高水溶性的刺激性气体,可以破坏上气道黏膜,从而诱发病毒感染^[27]。有研究表明, NO₂ 浓度对流行性腮腺炎的发病具有保护作用,而较高浓度的 NO₂(较低浓度范围内)则将对流行性腮腺炎发病的影响逆转为有害效应, NO₂ 会增加机体对病毒感染的易感性^[28]。鉴于 NO₂ 在不同研究中的结果各异,有关 NO₂ 机制的研究有待于进一步阐述。此外,有研究表明 CO 暴露与呼吸道症状相关,环境中低 CO 水平亦可能

促进内源性 CO 浓度的增加,产生碳氧血红蛋白,还会导致活性氧的产生和气道炎症的发展^[29],与本研究结果一致。

宁夏回族自治区日均气温、日均相对湿度、日均气压、日均风速等气象因素以及 O₃、SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀ 等大气污染物在一定范围内对流行性腮腺炎的发病均具有显著促进作用,本研究结果可为流行性腮腺炎的早期预防和反应系统的建设提供相关依据,但仍存在一定的局限性。首先,研究的期限被限制在 5 年,研究周期较短;其次,本研究收集的样本量较少,仅能把结局定义为是否新发病例,在今后的研究中可进一步收集相关数据定量研究气象因素和大气污染物与流行性腮腺炎新发病例数之间的关联。

参考文献

- [1] Hviid A, Rubin S, Muhlemann PK. Mumps[J]. *The Lancet*, 2008, 371(9616): 932-944.
- [2] Zhang H, Su K, Zhong XN. Association between meteorological factors and mumps and models for prediction in Chongqing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(11): 6625.
- [3] Su SB, Chang HL, Chen KT. Current status of mumps virus infection: epidemiology, pathogenesis, and vaccine[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1686.
- [4] Huang JF, Zhao ZY, Lu WK, et al. Correlation between mumps and meteorological factors in Xiamen City, China: a modelling study[J]. *Infectious Disease Modelling*, 2022, 7(2): 127-137.
- [5] SMITH GS, VAN DEN EEDEN SK, GARCIA C, et al. Air pollution and pulmonary tuberculosis: a nested case-control study among members of a northern California health plan[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(6): 761-768.
- [6] Huang L, Zhou L, Chen J, et al. Acute effects of air pollution on influenza-like illness in Nanjing, China: a population-based study[J]. *Chemosphere*, 2016, 147: 180-187.
- [7] Yu GQ, Li YH, Cai JS, et al. Short-term effects of meteorological factors and air pollution on childhood hand-foot-mouth disease in Guilin, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 646: 460-470.
- [8] Clay K, Lewis J, Severini E. Pollution, infectious disease, and mortality: evidence from the 1918 Spanish Influenza Pandemic[J]. *The Journal of Economic History*, 2018, 78(4): 1179-1209.
- [9] Zhang DD, Guo YM, Rutherford S, et al. The relationship between meteorological factors and mumps based on boosted regression tree model[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 695: 133758.
- [10] 王金玉,李盛,冯亚莉,等.气温对兰州市流行性感冒发病滞后效应[J]. *中国公共卫生*, 2019, 35(9): 1245-1249.
- [11] Lin S, Luo M, Walker RJ, et al. Extreme high temperatures and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases[J]. *Epidemiology*, 2009, 20(5): 738-746.

- [12] 郑大山, 郭玉清, 陈喆, 等. 基于分布滞后非线性模型分析气温对潍坊市手足口病影响 [J]. *中国公共卫生*, 2021, 37(3): 546 – 550.
- [13] Elith J, Leathwick JR, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802 – 813.
- [14] Fisman D. Seasonality of viral infections: mechanisms and unknowns[J]. *Clinical Microbiology and Infection*, 2012, 18(10): 946 – 954.
- [15] Lin CY, Su SB, Peng CJ, et al. The incidence of mumps in Taiwan and its association with the meteorological parameters: an observational study[J]. *Medicine*, 2021, 100(37): e27267.
- [16] Lin SQ, Ruan SM, Geng XY, et al. Non-linear relationships and interactions of meteorological factors on mumps in Jinan, China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2021, 65(4): 555 – 563.
- [17] Li RZ, Lin HL, Liang YM, et al. The short-term association between meteorological factors and mumps in Jining, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 568: 1069 – 1075.
- [18] 查文婷, 李渭通, 何嘉慧, 等. 湖南省流行性感冒与气象因素关系及预测 [J]. *中国公共卫生*, 2021, 37(3): 537 – 541.
- [19] 祝寒松, 王明斋, 谢忠杭, 等. 厦门市流行性感冒发病与气象因素影响 [J]. *中国公共卫生*, 2019, 35(10): 1404 – 1409.
- [20] Ciencewicky J, Trivedi S, Kleeberger SR. Oxidants and the pathogenesis of lung diseases[J]. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2008, 122(3): 456 – 468.
- [21] Ciencewicky J, Jaspers I. Air pollution and respiratory viral infection[J]. *Inhalation Toxicology*, 2007, 19(14): 1135 – 1146.
- [22] Valdenassi L, Franzini M, Ricevuti G, et al. Potential mechanisms by which the oxygen-ozone (O₂-O₃) therapy could contribute to the treatment against the coronavirus COVID-19[J]. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 2020, 24(8): 4059 – 4061.
- [23] Murray BK, Ohmine S, Tomer DP, et al. Virion disruption by ozone-mediated reactive oxygen species[J]. *Journal of Virological Methods*, 2008, 153(1): 74 – 77.
- [24] Chen GB, Zhang WY, Li SS, et al. Is short-term exposure to ambient fine particles associated with measles incidence in China? A multi-city study[J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 306 – 311.
- [25] Zhu S, Xia L, Wu JL, et al. Ambient air pollutants are associated with newly diagnosed tuberculosis: a time-series study in Chengdu, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 631 – 632: 47 – 55.
- [26] Zhang XH, Tang ML, Guo FJ, et al. Associations between air pollution and COVID-19 epidemic during quarantine period in China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115897.
- [27] Bascom R, Bromberg PA, Costa DA, et al. Health effects of outdoor air pollution[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1996, 153(1): 3 – 50.
- [28] Han M, Ji XT, Li GK, et al. NO₂ inhalation enhances asthma susceptibility in a rat model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27843 – 27854.
- [29] Piantadosi CA. Carbon monoxide, reactive oxygen signaling, and oxidative stress[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2008, 45(5): 562 – 569.