

2019—2023 年大气污染物对儿童哮喘的影响——基于南京市儿童医院哮喘门诊量的分析

韦丽¹, 龚兴¹, 熊丽林¹, 张艺¹, 孙凤霞¹, 潘伟^{2a}, 许长娣^{2b}

1. 南京市疾病预防控制中心环境卫生科, 江苏 210003

2. 南京医科大学附属儿童医院 a. 检验科 b. 呼吸科, 江苏 210008



DOI 10.11836/JEOM24364

摘要:

[背景] 哮喘严重影响着儿童的生长发育和心理健康, 对儿童哮喘水平的控制和风险因素的评估逐渐为人们所重视。越来越多的研究发现大气污染物暴露能够明显增加儿童哮喘的发病风险。

[目的] 了解南京市大气污染物浓度变化及南京市儿童医院哮喘门诊就诊情况, 定量分析不同大气污染物暴露对儿童哮喘门诊就诊量的影响。

[方法] 收集南京市 2019 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日的逐日细颗粒物(PM_{2.5})、可吸入颗粒物(PM₁₀)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)、臭氧(O₃)浓度数据, 气象数据(气温、气压和相对湿度)以及哮喘儿童门诊就诊资料, 采用基于类泊松分布的广义相加模型定量分析大气污染物短期暴露对儿童哮喘门诊就诊量的影响。

[结果] 2019—2023 年南京市大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 年平均浓度均未超过国家限值。单污染物模型分析显示 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、CO 均对儿童哮喘就诊量的单日滞后效应均在污染当天时最大, 污染物浓度每升高 10 个单位, 超额风险(ER)值分别为 1.39%(95%CI: 0.65%~2.14%)、1.46%(95%CI: 0.97%~1.95%)、5.46%(95%CI: 4.36%~6.57%)、0.18%(95%CI: 0.11%~0.26%), SO₂ 在 lag1 时达到最大效应, 浓度每升高 10 个单位, ER 值为 23.15%(95%CI: 13.57%~33.53%)。不同污染物最大累积滞后效应的时间不同, PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 分别在 lag01、lag01、lag02、lag02 和 lag03 时的累积滞后效应最大, ER 值分别为 1.35%(95%CI: 0.77%~1.92%)、0.96%(95%CI: 0.10%~1.83%)、28.50%(95%CI: 15.49%~42.98%)、6.92%(95%CI: 5.53%~8.33%)和 0.31%(95%CI: 0.20%~0.42%)。PM_{2.5}、PM₁₀ 对儿童哮喘门诊量的影响随年龄的增大而增加, NO₂、SO₂ 和 CO 则呈现随年龄的增大而减小的现象。

[结论] 大气污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO)会增加儿童哮喘就诊量, 且不同污染物对不同年龄段儿童哮喘就诊量的影响不同。

关键词: 大气污染物; 儿童; 哮喘; 门诊就诊量; 滞后效应

Impacts of ambient air pollutants on childhood asthma from 2019 to 2023: An analysis based on asthma outpatient visits of Nanjing Children's Hospital WEI Li¹, GONG Xing¹, XIONG Lilin¹, ZHANG Yi¹, SUN Fengxia¹, PAN Wei^{2a}, XU Changdi^{2b} (1. Departmental of Environmental Health, Nanjing Municipal Center for Disease Control and Prevention, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. a. Department of Clinical Laboratory b. Respiratory Department, Children's Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract:

[Background] Asthma poses a serious threat to children's growth, development, and mental health, thus there has been an increasing focus on the control of asthma morbidity in children and the assessment of its risk factors. A growing body of research has found that exposure to ambient air pollutants significantly increase the risk of childhood asthma.

[Objective] To understand the changes of ambient air pollutant concentrations in Nanjing and asthma outpatient visits to Nanjing Children's Hospital, and to quantitatively analyze the effects of exposure to different ambient air pollutants on children's asthma outpatient visits.

[Methods] Daily data of ambient air pollutants fine particulate matter (PM_{2.5}), inhalable particle (PM₁₀), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), ozone (O₃),

基金项目

南京市卫生科技发展项目(ZKX20046, YKK21177)

作者简介

韦丽(1988—), 女, 硕士, 主管医师;
E-mail: weilisunny@163.com

通信作者

许长娣, E-mail: xcd_118@163.com

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2024-07-26

录用日期 2025-02-17

文章编号 2095-9982(2025)04-0408-08

中图分类号 R12

文献标志码 A

►本文链接、作者贡献申明

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24364

►引用

韦丽, 龚兴, 熊丽林, 等. 2019—2023 年大气污染物对儿童哮喘的影响——基于南京市儿童医院哮喘门诊量的分析[J]. 环境与职业医学, 2025, 42(4): 408-414, 419.

Funding

This study was funded.

Correspondence to

XU Changdi, E-mail: xcd_118@163.com

Editorial Board Members' authorship No

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2024-07-26

Accepted 2025-02-17

► Link to this article, author contribution statement

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24364

► To cite

WEI Li, GONG Xing, XIONG Lilin, et al. Impacts of ambient air pollutants on childhood asthma from 2019 to 2023: An analysis based on asthma outpatient visits of Nanjing Children's Hospital[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(4): 408-414, 419.

meteorological factors (air temperature & relative humidity), and outpatient visits due to asthma in the hospital from January 1, 2019 to December 31, 2023 were collected, and a generalized additive model based on quasi poisson distributions was used to quantitatively analyze the short-term effects of ambient air pollutant exposure on outpatient visits due to asthma in the hospital.

[Results] The annual average concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , and NO_2 in Nanjing from 2019 to 2023 did not exceed the national limits. For single-day lagged effects, the single-pollutant model showed that the effects of $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , and CO on children's asthma outpatient visits were greatest for every 10 units increase at lag0, with excess risk (ER) of 1.39% (95%CI: 0.65%, 2.14%), 1.46% (95%CI: 0.97%, 1.95%), 5.46% (95%CI: 4.36%, 6.57%), and 0.18% (95%CI: 0.11%, 0.26%), respectively, and SO_2 reached the maximum effect at lag1, with an ER of 23.15% (95%CI: 13.57%, 33.53%) for each 10 units increase in concentration. Different pollutants reached their maximum cumulative lag effects at different time. The PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , and CO showed the largest cumulative lag effects at lag01, lag01, lag02, lag02, and lag03, respectively, with ERs of 1.35% (95%CI: 0.77%, 1.92%), 0.96% (95%CI: 0.10%, 1.83%), 28.50% (95%CI: 15.49%, 42.98%), 6.92% (95%CI: 5.53%, 8.33%), and 0.31% (95%CI: 0.20%, 0.42%), respectively. The influences of $PM_{2.5}$ and PM_{10} on outpatient visits due to asthma in the hospital became more pronounced with advancing age, while the associations with NO_2 , SO_2 , and CO were weakened as children grew older.

[Conclusion] Ambient air pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO) can increase childhood asthma visits, and different pollutants have varied effects on the number of asthmatic children's visits at different ages.

Keywords: ambient air pollutant; child; asthma; outpatient visit; lag effect

哮喘是一种以可逆性气流受限、气道高反应性和气道慢性炎症为特征的慢性呼吸道疾病,易反复发作,是儿童常见的慢性呼吸系统疾病,损伤儿童的肺功能,长期的呼吸损伤可能进一步发展为成人哮喘,给社会和患儿家庭带来一定的疾病负担,且影响患儿的学业^[1]。1990—2019年期间,全球哮喘发病率中位数为402例/10万,其中10岁以下儿童哮喘发病率的中位数为1380.3例/10万^[2]。2019年我国1~19岁儿童青少年哮喘发病率和患病率分别为718.23例/10万和2897.73例/10万,相较于1990年,2019年儿童青少年哮喘发病率和患病率均上升^[3]。因此,儿童哮喘是我国乃至世界的公共卫生领域的一个重要议题。

尽管一般认为儿童哮喘发病的危险风险因素主要为过敏原或病原体的接触,然而大气污染的暴露从生命早期就已经开始,近年来,越来越多的研究发现大气污染物暴露能够明显增加儿童哮喘的发病风险^[4-7]。作为长江三角洲地区重要的经济中心,南京市具有工业规模大,人口密集的特点,尽管近年来南京市各大气污染物的均值均低于GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[8]的二级浓度限值,但依旧远未达到世界卫生组织(World Health Organization, WHO)全球空气质量指南^[9]推荐的年均限值。儿童的呼吸系统、免疫系统较为脆弱,是大气污染的敏感人群^[10-11],大气污染对儿童哮喘的影响值得关注。因此,本研究拟采用时间分层-病例交叉设计的广义相加模型(generalized additive models, GAM)定量分析2019—2023年大气污染物对南京市儿童哮喘门诊就诊量的影响,完善哮喘发病相关的风险因素,为采取针对措施减少儿童哮喘发生,保护易感儿童,提高儿童健康水平提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 大气污染物和气象资料的收集

收集2019年1月1日—2023年12月31日南京市逐日大气污染物资料、气象资料和儿童哮喘门诊就诊资料。气象资料来源于南京市气象局,包括气温(°C)、相对湿度(%)。大气污染物资料来源于南京市生态环境局,共收集13个国家空气质量监测站点(玄武湖、瑞金路、奥体中心、中华门、浦口、草场门、山西路、迈皋桥、仙林大学城、高淳老职中、溧水永阳、江宁彩虹桥、六合雄州)数据,监测范围覆盖南京市全部11个区,监测数据包括细颗粒物(fine particulate mater, $PM_{2.5}$)、可吸入颗粒物(inhalable particle, PM_{10})、二氧化硫(sulfur dioxide, SO_2)、二氧化氮(nitrogen dioxide, NO_2)、一氧化碳(carbon monoxide, CO)日均浓度和臭氧(ozone, O_3)8 h最大浓度。

1.2 儿童哮喘门诊就诊资料的收集

南京市儿童医院是南京市唯一一所大型的三级甲等综合性儿童医院,具有两个院区(广州路院区和河西院区),就诊人群覆盖整个市区,除呼吸科外,还设有哮喘专病门诊如哮喘中心专病门诊、过敏中心(呼吸科)等,据统计南京市儿童医院的门诊就诊量约占全市儿科门诊就诊总量的70%左右,能较好地反映本地儿童就诊情况。本研究从南京市儿童医院2019年1月1日—2023年12月31日的门诊就诊资料中根据家庭住址筛选出居住地为南京的就诊儿童,年龄范围为0~14岁,根据《国际疾病分类标准(第10版)》(International Classification of Diseases 10th Revision, ICD-10)选取纳入本研究的哮喘儿童,具体ICD-10编码为J45(J45.0、J45.1、J45.8、J45.9),同时提取相应的就诊

时间、年龄和性别等主要信息。本研究通过了南京市疾病预防控制中心伦理委员会的审查(批准号: PJ2021-A001-03)。

1.3 统计学分析

经正态性检验,对不符合正态分布的大气污染物浓度数据、气象条件数据和儿童哮喘日门诊量数据利用最小值、四分位数、最大值进行统计描述,并对大气污染物浓度与气象条件进行 Spearman 秩相关分析。

采用基于时间分层-病例交叉设计 GAM 进行分析,明确大气污染物对儿童哮喘门诊就诊量的影响。在此设计中将日期按照时间分层,将患者就诊当日作为病例期,将同一年同一个月内相同星期几作为对照期,如将 2019 年 1 月 1 日(星期二)作为病例期,则 2019 年 1 月其他的星期二均为对照期,这样每个病例的对照都是其自身,可以很好地控制季节趋势、假期效应和“星期几效应”以及一些未测量或无法获得变量造成的偏倚^[12]。计算见公式(1):

$$\text{Log}(Y_i) = \beta(\text{Pollutant}) + \text{stratum} + \text{ns}(\text{Temp}, \text{df}_1) + \text{ns}(\text{RH}, \text{df}_2) \quad (1)$$

其中: $\text{Log}(Y_i)$ 为 0~14 岁儿童哮喘逐日发病例数的对数值, β 表示哮喘与 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的暴露-反应关系系数, stratum 为时间分层哑变量, ns 为自然三次样条平滑函数, Temp 为平均温度, RH 为相对湿度, df_1 、 df_2 分别为自然样条平滑函数中控制平均温度、平均湿度时相应的自由度,查阅文献^[13]可知 df_1 、 df_2 的分别取值均为 6 和 3。

定量评估各大气污染物浓度每升高 10 个单位,儿童哮喘门诊量增加的超额危险度 (excess risk, ER),并计算 ER 的 95% 可信区间 (confidence interval, CI),计算见公式(2)和(3):

$$\text{ER} = [\exp(\beta \times 10) - 1] \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{CI} = \exp[(\beta \pm 1.96 \times \text{SE}) \times 10] - 1 \times 100\% \quad (3)$$

其中: SE 为标准差。

本研究采用 R 4.3.0 软件进行统计描述和相关性分析。采用数据包中的“mgcv”“dlnm”软件包构建 GAM 模型,双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 基本情况

2019—2023 年共收集 1826 d 大气污染物、气象条件和儿童哮喘门诊就诊资料。儿童哮喘门诊总量为 42 496 人次,日均门诊量为 (23.27±13.21) 人次,平均年

龄为 (6.30±2.30) 岁。其中男童占比 62.57% (26 590/42 496),女童占比 37.43% (15 906/42 496); 0~6 儿童占比 50.81% (21 594/42 496), 7~12 岁儿童占比 43.70% (18 572/42 496), 12 岁以上儿童占比 5.48% (2 330/42 496)。

2019—2023 年南京市大气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 的年平均质量浓度(后简称为浓度)中位数分别为 $27.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $51.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $27.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.70 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $100.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均未超过 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[8] 中二级浓度限值。 O_3 的超标天数为 252 d, 超标率为 13.80%。大气污染物浓度及气象因素情况见表 1。

表 1 2019—2023 年南京市大气污染物浓度、气象条件及儿童哮喘门诊量情况

Table 1 Ambient air pollutant concentrations, meteorological variables, and outpatient visits of children with asthma in Nanjing from 2019 to 2023

指标	Min	P_{25}	P_{50}	P_{75}	Max	超标天数/d
大气污染物						
$\text{NO}_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	5.64	19.89	27.91	39.89	109.00	0
$\text{SO}_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	3.00	5.00	6.14	8.00	19.86	0
$\text{CO}/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.30	0.58	0.70	0.84	1.64	0
$\text{O}_3/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	9.36	70.00	100.56	136.84	241.07	252
$\text{PM}_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	4.00	18.14	27.00	39.57	140.79	0
$\text{PM}_{10}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	6.36	36.00	51.67	74.63	304.07	0
气象条件						
气温/ $^{\circ}\text{C}$	-4.80	9.40	17.90	25.30	35.40	—
相对湿度/%	31.00	61.00	72.00	84.00	100.00	—
日均门诊量/人次	0	14.00	23.00	32.00	85.00	—

[注] 根据 GB 3095—2012《环境空气质量标准》中二级浓度限值要求, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 年平均质量浓度(后简称为浓度)限值分别为 35、70、60 和 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, CO 的 24 h 平均浓度限值为 $4 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 的日最大 8 h 平均浓度限值为 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2019—2021 年南京市大气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO 的年平均浓度中位数分别为 $28.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $55.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $7.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $30.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $99.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.78 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 2022—2023 年南京市大气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO 的年平均浓度中位数分别为 $24.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $46.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $23.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $103.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.60 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对 2019—2021 年和 2022—2023 年大气污染物浓度进行统计比较, $\text{PM}_{2.5}$ ($Z=-6.15$, $P<0.01$)、 PM_{10} ($Z=-6.62$, $P<0.01$)、 SO_2 ($Z=-15.08$, $P<0.01$)、 NO_2 ($Z=-12.17$, $P<0.01$)、 O_3 ($Z=-2.73$, $P=0.006$) 和 CO ($Z=-20.08$, $P<0.01$) 的浓度差异均具有统计学意义, O_3 浓度有略上升趋势,

其他污染物的浓度均是 2022—2023 年低于 2019—2021 年。

2.2 大气污染物之间、大气污染物和气象因素之间的相关性分析

相关性分析结果显示,PM₁₀ 与 CO、O₃ 与 CO 之间没有明显的相关性($P>0.05$),其他污染物之间以及气温、相对湿度与大气污染物之间均有相关性($P<0.05$),气温和相对湿度之间也具有相关性($P<0.05$)。各大气污染物和气象因素之间的相关性见表 2。

2.3 大气污染物对儿童哮喘的超额就诊风险

大气污染物对儿童哮喘影响的单污染物模型分析显示,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 对儿童哮喘门诊量单日滞后效应的影响均具有统计学意义($P<0.05$),且 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、CO 对儿童哮喘门诊就诊量的影响均在 lag0 时效应达到最大,SO₂ 在 lag1 时效应最大,

未见 O₃ 与儿童哮喘具有明显的正相关。见图 1。

表 2 2019—2023 年南京市大气污染物和气象因素相互之间的相关性(r)

Table 2	Correlations between ambient air pollutants and meteorological factors in Nanjing from 2019 to 2023 (r)							
分类	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂	气温	相对湿度
PM ₁₀	1							
PM _{2.5}	0.900 [*]	1						
NO ₂	0.766 [*]	0.716 [*]	1					
O ₃	0.001 [*]	-0.103 [*]	-0.187 [*]	1				
CO	0.544	0.623 [*]	0.581 [*]	-0.016	1			
SO ₂	0.549 [*]	0.446 [*]	0.551 [*]	0.190 [*]	0.580 [*]	1		
气温	-0.433 [*]	-0.492 [*]	-0.471 [*]	0.649 [*]	-0.095 [*]	-0.083 [*]	1	
相对湿度	-0.420 [*]	-0.172 [*]	-0.259 [*]	-0.335 [*]	0.098 [*]	-0.403 [*]	0.139 [*]	1

[注]*: $P<0.05$ 。

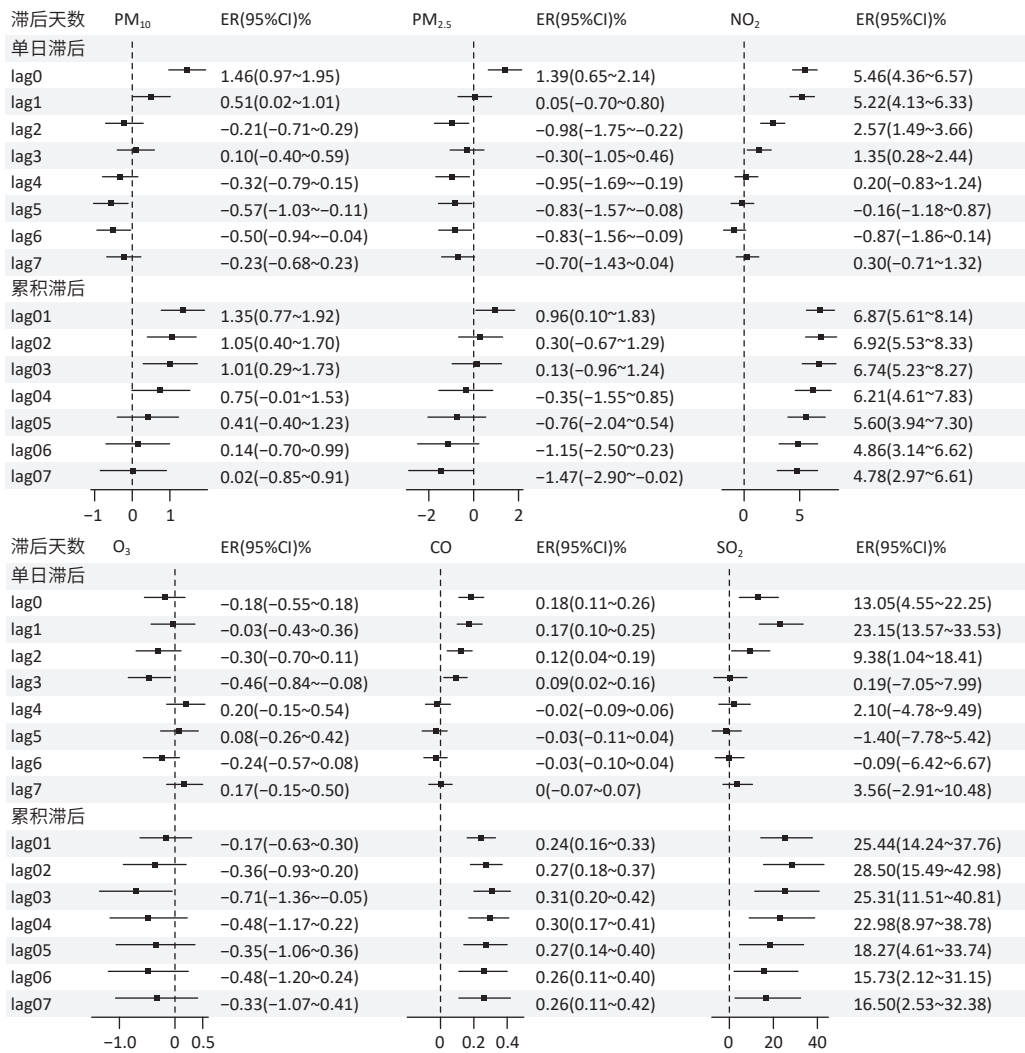


图 1 2019—2023 年南京市大气污染物浓度每升高 10 个单位时儿童哮喘的超额就诊风险 [ER(95%CI), %]

Figure 1 The excess risk of per 10 units increase in ambient air pollutants on outpatient visits of children with asthma in Nanjing from 2019 to 2023[ER (95%CI),%]

大气污染对儿童哮喘门诊就诊量的累积滞后效应分析显示, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 在 lag01 时累积滞后效应最大, SO_2 、 NO_2 在 lag02 时累积滞后效应最大, 并且累积滞后效应随累积滞后时间的增加而降低。CO 的累积滞后效应呈现先增加后降低的趋势, 在 lag03 时累积滞后效应最大。未见 O_3 与儿童哮喘具有明显的正相关。见图 1。

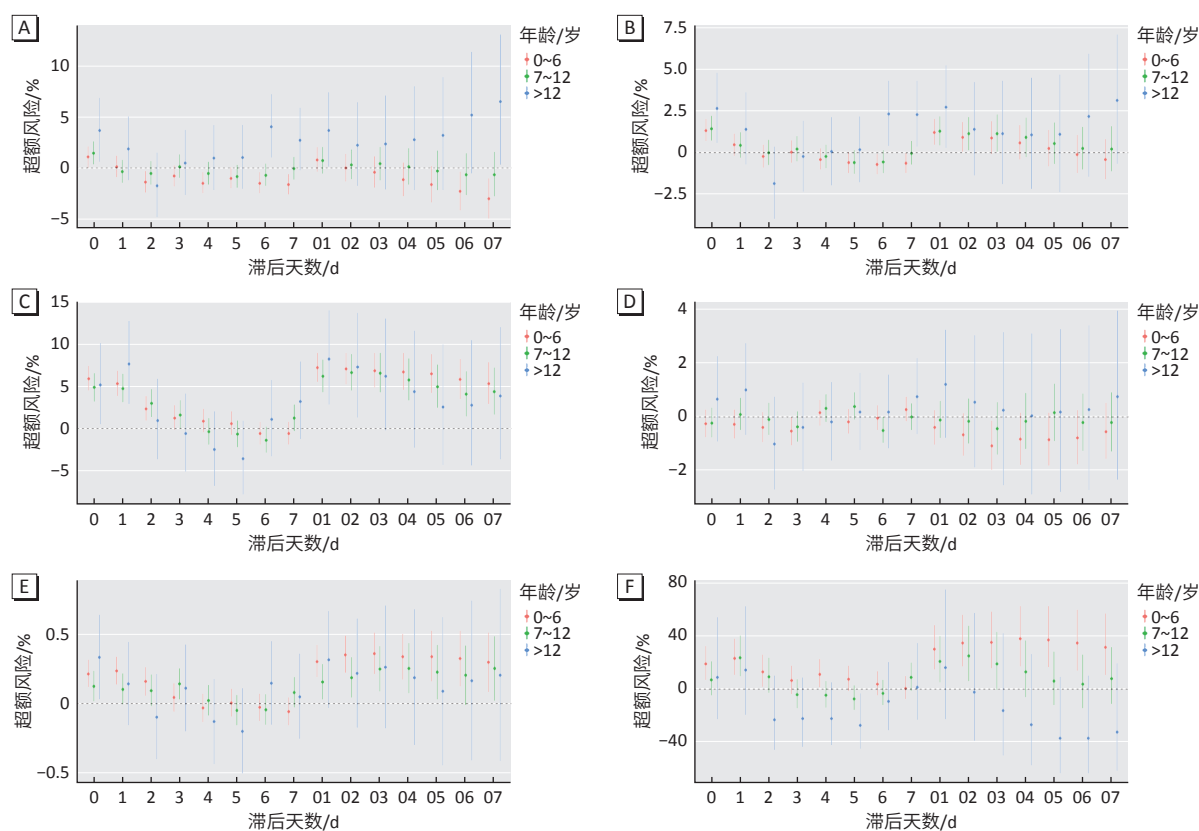
2.4 大气污染物对不同年龄段儿童哮喘的超额就诊风险

按年龄 (0~6 岁, 7~12 岁, >12 岁) 进行分层分析, 不同大气污染物对不同年龄组儿童哮喘就诊影响的单日滞后效应和累积滞后效应不同。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 对儿童的影响随年龄的增大而增加, NO_2 、 SO_2 和 CO 对儿童的影响则大体呈现随年龄的增大而减小的现象。 O_3 对各年龄段儿童的影响均不具有统计学意义 ($P > 0.05$)。具体见图 2。

2.5 双污染物及多污染物模型分析

在不同污染物的最佳单日滞后和最佳累积滞后

期, 分别建立双污染物模型和多污染物模型进一步分析大气污染物对儿童哮喘的影响。表 3 显示, 对于 PM_{10} 而言, 除在双污染物模型中对 NO_2 进行调整时其单日滞后和累积滞后效应无统计学意义外, 在其他模型中均具有统计学意义 ($P < 0.05$), 效应值均稳定; 对于 $\text{PM}_{2.5}$ 而言, 其在双污染物和单污染物模型中的效应均不稳定, 仅在单日滞后期调整 O_3 和 SO_2 以及累积滞后期调整 O_3 时具有统计学意义的效应值 ($P < 0.05$); NO_2 在各模型中的效应值均稳定且具有统计学意义 ($P < 0.05$); 对于 CO 而言, 仅在双污染物模型中调整 NO_2 后和多污染模型中的单日滞后效应不具有统计学意义, 在其他模型中的效应值均稳定且具有统计学意义 ($P < 0.05$); 对于 SO_2 而言, 仅在双污染物模型中调整 NO_2 后和多污染模型中的累积滞后效应不具有统计学意义, 在其他模型中的效应值均稳定且具有统计学意义 ($P < 0.05$)。



[注] A: $\text{PM}_{2.5}(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$, B: $\text{PM}_{10}(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$, C: $\text{NO}_2(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$, D: $\text{O}_3(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$, E: $\text{CO}(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$, F: $\text{SO}_2(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ 。

图 2 2019—2023 年南京市大气污染物浓度每升高 10 个单位时各年龄段儿童哮喘的超额就诊风险 [ER(95%CI), %]

Figure 2 The excess risk of per 10 units increase in ambient air pollutants on outpatient visits for children with asthma by age group in Nanjing from 2019 to 2023 [ER (95%CI), %]

表3 大气污染物对儿童哮喘门诊就诊量影响的双污染物及多污染物模型分析

Table 3 Dual- and multi-pollutant models of the impact of ambient air pollutants on outpatient visits of children with asthma

大气 污染物	最佳 滞后	双污染物模型						多污染物模型
		+PM ₁₀	+PM _{2.5}	+NO ₂	+O ₃	+CO	+SO ₂	
PM ₁₀	lag0	—	2.68 (1.71~3.66) [*]	0.06 (-0.53~0.69)	1.68 (1.17~2.19) [*]	1.12 (0.50~1.75) [*]	1.38 (0.85~1.92) [*]	2.49 (1.48~3.51) [*]
	lag01	—	1.23 (0.38~2.09) [*]	-0.05 (-0.70~0.60)	1.45 (0.87~2.04) [*]	0.78 (0.12~1.47) [*]	1.18 (0.58~1.79) [*]	1.05 (0.19~1.91) [*]
PM _{2.5}	lag0	-2.10 (-3.51~-0.66) [*]	—	-1.35 (-2.26~-0.42) [*]	1.61 (0.83~2.39) [*]	-0.003 (-1.08~1.08)	1.11 (0.31~1.92) [*]	-4.30 (-5.93~-2.63) [*]
	lag01	-2.45 (-3.74~-1.14) [*]	—	-1.48 (-2.44~-0.50) [*]	1.10 (0.22~1.99) [*]	-0.64 (-1.72~0.45)	0.64 (-0.26~1.54)	-3.24 (-4.53~-1.93) [*]
NO ₂	lag0	5.38 (4.03~6.74) [*]	6.67 (5.29~8.09) [*]	—	5.57 (4.47~6.69) [*]	6.58 (5.09~8.10) [*]	6.54 (5.21~7.88) [*]	7.11 (5.45~8.79) [*]
	lag02	6.67 (5.02~8.34) [*]	8.21 (6.50~9.96) [*]	—	6.98 (5.59~8.38) [*]	7.08 (5.44~8.75) [*]	7.10 (5.61~8.61) [*]	7.47 (5.68~9.29) [*]
CO	lag0	0.08 (-0.01~0.17)	0.19 (0.08~0.29) [*]	-0.11 (-0.21~-0.01)	0.20 (0.13~0.28) [*]	—	0.17 (0.09~0.26) [*]	0.04 (-0.08~0.17)
	lag03	0.19 (0.07~0.32) [*]	0.28 (0.15~0.40) [*]	0.10 (-0.02~0.22)	0.32 (0.21~0.43) [*]	—	0.28 (0.17~0.40) [*]	0.17 (0.04~0.30) [*]
SO ₂	lag1	17.51 (8.13~27.71) [*]	19.84 (10.19~30.33) [*]	11.01 (2.02~20.80) [*]	23.16 (13.59~33.54) [*]	17.78 (8.27~28.14) [*]	—	13.15 (3.87~23.27) [*]
	lag02	18.37 (5.81~32.43) [*]	23.11 (9.97~37.82)	3.20 (-8.26~16.09)	28.89 (15.83~43.43)	18.23 (5.20~32.88)	—	5.00 (-6.88~18.39)

[注]*: $P < 0.05$ 。

3 讨论

本研究结果表明近年来南京市大气污染状况有所好转,但依旧远未达到 WHO 的推荐限值,大气污染对人群(尤其是儿童)的健康影响依旧值得关注。本研究从 2019—2023 年南京市儿童医院门诊就诊信息中共收集到了 42 496 人次的儿童哮喘门诊就诊资料,通过基于时间分层-病例交叉设计的 GAM 分析发现,部分大气污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO)与儿童哮喘门诊量存在正相关,且不同年龄段的儿童对大气污染物的敏感程度不同。

本研究结果表明 2019—2023 年南京市大气污染物 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 均未超过 GB 3095—2012《环境空气质量标准》^[8]年平均浓度限值,O₃ 日最大 8 h 平均浓度存在超标现象,超标率为 13.80%(252/1826)。在 2019—2023 年的儿童哮喘门诊人群中,男童占比超过 60%,高于女童,这可能是由于儿童时期,女孩大气道生长速度快于实质组织,而男孩则相反,导致男孩气道比女孩更为狭窄^[14],此外,儿童时期男孩总免疫球蛋白 E(Immunoglobulin E, IgE)水平高于女孩也可能在哮喘的发病中发挥重要作用^[15]。本研究中门诊儿童平均年龄为(6.30±2.30)岁;12 岁及以下哮喘儿童占比超过 90.00%,这可能与低年龄段儿童呼吸道较为狭窄有关^[16]。

PM₁₀ 和 PM_{2.5} 是一直以来广受关注的颗粒物。本研究发现大气颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5} 的暴露与儿童哮喘的门诊量相关,且均在 lag0 时具有最大的 ER 值。既往研究表明 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 进入呼吸道后,可通过机械损伤和表面吸附的有害物质发挥毒性作用,如诱导氧化应激、气道炎症、气道高反应性和气道重塑等^[17-19],这

可能是 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 诱导哮喘发作的潜在机制。SO₂ 主要来源于化石燃料的燃烧,本研究发现在 lag02 时,大气中 SO₂ 每升高 10 μg·m⁻³,儿童哮喘的门诊量增加 28.50%,这可能与 SO₂ 可引起气道严重收缩^[20]和局部气道炎症^[21]的产生有关。NO₂ 是一种难溶于水的大气污染物,极易通过弥散到达远端气道,从而可能造成气道上皮损伤和平滑肌张力增加^[22],在本研究中则发现 NO₂ 的暴露与儿童哮喘的门诊量相关,在 lag02 时,大气中 NO₂ 每升高 10 μg·m⁻³,儿童哮喘的门诊量增加 6.92%。已有的研究关于 CO 和 O₃ 与哮喘之间关联的结论并不一致。对于 CO,目前关于其与哮喘之间相关性的研究较少,在杭州的研究^[23]中,研究者并未发现 CO 与哮喘之间的关联,而在兰州的研究^[24]中,研究者们则发现 CO 与哮喘的门诊量相关,在本研究中也发现了类似的结果。这可能与 CO 会在气道中发挥双重作用有关,一方面生命早期 CO 的暴露会影响肺功能的发育,过量的 CO 暴露还会导致缺氧^[25],而另一方面 CO 在气道中还可发挥抗炎功能^[26]。对于 O₃,目前广泛的研究认为 O₃ 可通过诱发氧化应激和气道炎症^[27]并增加哮喘患者对过敏原的反应性而导致哮喘恶化,但在本研究和北京的一项研究^[28]中并未发现 O₃ 与哮喘之间的正相关,这可能是因为 O₃ 与其他污染物(如 PM_{2.5}、NO₂、CO)呈负相关,受其他污染物影响其滞后期并不在本研究的观察范围内,因此无法观测到效应。此外,不同地区人群对空气污染物的易感性不同也可能导致不一致结论的产生。本研究分层分析显示,PM_{2.5} 和 PM₁₀ 对儿童哮喘的影响随着年龄的增加而增加,这可能是因为随着年龄的增加,儿童在户外的活动时间变长,活动范围变大,因此与颗粒物的接

触也越多所导致的^[29]。NO₂、SO₂和CO则与颗粒物相反,敏感人群主要为0~6岁的儿童,这可能是因为这部分儿童免疫和呼吸系统发育程度低,更易受到污染物的损伤^[30]。此外,低年龄段的儿童往往呼吸频率更高^[31],因此,污染物的暴露可能也越高。

本研究通过对南京市2019—2023年的大气污染物与儿童哮喘门诊量之间的关联性分析发现大气污染物的浓度对儿童健康会产生影响,其浓度的升高可能会增加儿童哮喘门诊量,且不同污染物的滞后期不同,上述结论可为相关部门根据滞后期进行预警,并合理分配医疗资源提供科学依据。本研究还发现不同年龄段的儿童对大气污染物的敏感程度不同,提示针对不同污染天气,加强对敏感儿童的防护,以减轻大气污染对儿童健康的影响。

参考文献

- [1] 刘丹丹. 衡水市0-14岁儿童哮喘流行病学调查及相关因素分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2023.
LIU D D. Epidemiological investigation and related factors analysis of asthma in children aged 0-14 years in Hengshui city[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2023.
- [2] XU Q, ZHOU Q, CHEN J, et al. The incidence of asthma attributable to temperature variability: an ecological study based on 1990-2019 GBD data[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 904: 166726.
- [3] 伊娜, 刘婷婷, 周宇畅, 等. 1990—2019年中国儿童青少年哮喘疾病负担分析[J]. 中华流行病学杂志, 2023, 44(2): 235-242.
YI N, LIU T T, ZHOU Y C. Disease burden of asthma among children and adolescents in China, 1990-2019[J]. *Chin J Epidemiol*, 2023, 44(2): 235-242.
- [4] PEDERSEN M, LIU S, ZHANG J, et al. Early-life exposure to ambient air pollution from multiple sources and asthma incidence in children: a nationwide birth cohort study from Denmark[J]. *Environ Health Perspect*, 2023, 131(5): 57003.
- [5] PIERANGELI I, NIEUWENHUIJSEN M J, CIRACH M, et al. Health equity and burden of childhood asthma-related to air pollution in Barcelona[J]. *Environ Res*, 2020, 186: 109067.
- [6] Chen G, Zhou H, He G, et al. Effect of early-life exposure to PM_{2.5} on childhood asthma/wheezing: a birth cohort study. *Pediatr Allergy Immunol*. 2022;33(6): 10.1111/pai. 13822.
- [7] WU C, ZHANG Y, WEI J, et al. Associations of early-life exposure to submicron particulate matter with childhood asthma and wheeze in China[J]. *JAMA Netw Open*, 2022, 5(10): e2236003.
- [8] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB3095-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 1-6.
Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Ambient Air Quality Standards: GB3095-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 1-6.
- [9] World Health Organization. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide[R]. Geneva: World Health Organization, 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
- [10] 张莉君, 许慧慧, 朱凤鸣, 等. 上海市儿童呼吸系统疾病空气质量健康指数的建立[J]. 环境与职业医学, 2022, 39(7): 730-736.
ZHANG L J, XU H H, ZHU F M, et al. Construction of an air quality health index for pediatric respiratory diseases in Shanghai[J]. *J Environ Occup Med*, 2022, 39(7): 730-736.
- [11] 胡翠玲, 徐婕, 沈国妹, 等. 上海市空气污染物与儿童呼吸系统疾病门诊量的时间序列研究[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(1): 23-29.
HU C L, XU J, SHEN G M, et al. Associations between air pollutants and daily hospital visits in children for respiratory disorders in Shanghai: a time-series study[J]. *J Environ Occup Med*, 2021, 38(1): 23-29.
- [12] 梁子越, 陈风格, 张莹, 等. 石家庄市大气NO₂短期暴露对儿童神经系统门诊量影响的病例交叉研究[J]. 环境与职业医学, 2024, 41(3): 288-293.
LIANG Z Y, CHEN F G, ZHANG Y, et al. A case-crossover study on association between short-term atmospheric NO₂ exposure and outpatient visits due to pediatric neurological system conditions in Shijiazhuang[J]. *J Environ Occup Med*, 2024, 41(3): 288-293.
- [13] 彭星宇, 王彦丁, 张新民, 等. 华中某市大气污染物O₃、PM_{2.5}暴露对居民死亡的时间序列研究[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(3): 331-341.
PENG Xingyu, WANG Yanding, ZHANG Xinmin, et al. Associations of ambient PM_{2.5} and O₃ with human mortality: A time-series study in a city of central China[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2023, 40(3): 331-341.
- [14] Carey MA, Card JW, Voltz JW, et al. It's all about sex: gender, lung development and lung disease. *Trends Endocrinol Metab*. 2007;18(8): 308-313.
- [15] ZHANG P, ZEIN J. Novel insights on sex-related differences in asthma[J]. *Curr Allergy Asthma Rep*, 2019, 19(10): 44.
- [16] 雷洋. 不同性别、不同年龄阶段上气道大小的CBCT研究[D]. 山东大学, 2020.
LEI L. CBCT Study of Upper Airway Dimensions in Different Age Groups and Genders[D]. Shandong University, 2020.
- [17] LUBNER R J, RUBEL K, CHANDRA R K, et al. Particulate matter exposure is associated with increased inflammatory cytokines and eosinophils in chronic rhinosinusitis[J]. *Allergy*, 2024, 79(5): 1219-1229.
- [18] LIU K, HUA S, SONG L, et al. PM_{2.5} exposure and asthma development: the key role of oxidative stress[J]. *Oxid Med Cell Longev*, 2022, 2022: 3618806.
- [19] CHEN S J, HUANG Y, YU F, et al. BMAL1/p53 mediating bronchial epithelial cell autophagy contributes to PM_{2.5}-aggravated asthma[J]. *Cell Commun Signal*, 2023, 21(1): 39.
- [20] LIN A H, HSU C C, LIN Y S, et al. Mechanisms underlying the stimulatory effect of inhaled sulfur dioxide on vagal bronchopulmonary C-fibres[J]. *J Physiol*, 2020, 598(5): 1093-1108.
- [21] LI X, YI H. Sulfur dioxide-enhanced asthma susceptibility is involved with inhibition of bitter taste transduction in mouse lung[J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2022, 95: 103938.
- [22] LU C, LIU Q, QIAO Z, et al. High humidity and NO₂ co-exposure exacerbates allergic asthma by increasing oxidative stress, inflammatory and TRP protein expressions in lung tissue[J]. *Environ Pollut*, 2024, 353: 124127.
- [23] FENG Y, YANG X, WANG Y, et al. The short-term association between environmental variables and daily pediatric asthma patient visits in Hangzhou, China: a time-series study[J]. *Heliyon*, 2024, 10(18): e37837.
- [24] LIU Y, YOU J, DONG J, et al. Ambient carbon monoxide and relative risk of daily hospital outpatient visits for respiratory diseases in Lanzhou, China[J]. *Int J Biometeorol*, 2023, 67(12): 1913-1925.

(下转第419页)

- [5] 史纯珍, 屈瑶, 毛旭. 大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中多环芳烃的分析测定与污染特征 [J]. *环境化学*, 2015, 34(8): 1417-1423.
SHI C Z, QU Y, MAO X. Analysis and pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in PM_{2.5} [J]. *Environ Chem*, 2015, 34(8): 1417-1423.
- [6] 张斌, 李丹, 沈振兴, 等. 民用燃烧源排放 PM_{2.5} 中多环芳烃的光化学氧化过程 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(10): 5371-5377.
ZHANG B, LI D, SHEN Z X, et al. Photochemical oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} emitted from residential combustion sources [J]. *China Environ Sci*, 2024, 44(10): 5371-5377.
- [7] 付丹, 王冬明, 韩维峰. 冬季供暖对大气环境的影响及改善措施 [J]. *环境生态学*, 2020, 2(1): 76-78.
FU D, WANG D M, HAN W Z. Influence of winter heating on atmospheric environment and improvement measures [J]. *Environ Ecol*, 2020, 2(1): 76-78.
- [8] LI B, ZHOU S, WANG T, et al. Spatio-temporal distribution and influencing factors of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River Delta [J]. *J Clean Prod*, 2020, 267: 122049.
- [9] ZHANG R H, LI Q, ZHANG R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013 [J]. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57(1): 26-35.
- [10] 王建英, 陈珂, 刘洋, 等. 北方城市冬季采暖期对环境空气质量的影响 [J]. *当代化工研究*, 2017(8): 142-143.
WANG J Y, CHEN K, LIU Y, et al. Influence of winter heating period on ambient air quality in northern cities [J]. *Chem Intermed*, 2017(8): 142-143.
- [11] 董小艳, 王琼, 杨一兵, 等. 2017 年春节期间北京市城区和郊区大气 PM_{2.5} 及其中多环芳烃的污染特征 [J]. *环境化学*, 2018, 37(10): 2191-2198.
DONG X Y, WANG Q, YANG Y B, et al. Characterization of ambient PM_{2.5} and PAHs during 2017 Spring Festival in urban and suburb areas of Beijing [J]. *Environ Chem*, 2018, 37(10): 2191-2198.
- [12] 李志明, 张金龙. 大气中多环芳烃的分布特征研究进展 [J]. *山东化工*, 2023, 52(17): 77-79.
LI Z M, ZHANG J L. Research progress on distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmosphere [J]. *Shandong Chem Ind*, 2023, 52(17): 77-79.
- [13] 马宇熙, 张莹, 房苗, 等. 2019—2020 年乌鲁木齐市采暖期与非采暖期大气 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征及来源分析 [J/OL]. *环境与健康杂志*, 1-6 [2024-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1095.R.20230621.1806.002.html>.
MA Y X, ZHANG Y, FANG M, et al. Pollution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric of PM_{2.5} during the heating and non-heating period of 2019-2020 in Urumqi [J/OL]. *J Environ Health*, 1-6 [2024-09-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1095.R.20230621.1806.002.html>.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)

(上接第 414 页)

- [25] TIAN F, ZHONG X, YE Y, et al. Mutual associations of exposure to ambient air pollutants in the first 1000 days of life with asthma/wheezing in children: prospective cohort study in Guangzhou, China [J]. *JMIR Public Health Surveill*, 2024, 10: e52456.
- [26] ZHANG X, YUAN Z, WU J, et al. An orally-administered nanotherapeutics with carbon monoxide supplying for inflammatory bowel disease therapy by scavenging oxidative stress and restoring gut immune homeostasis [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(21): 21116-21133.
- [27] WIEGMAN C H, LI F, RYFFEL B, et al. Oxidative stress in ozone-induced chronic lung inflammation and emphysema: a facet of chronic obstructive pulmonary disease [J]. *Front Immunol*, 2020, 11: 1957.
- [28] ZHAO Y, KONG D, FU J, et al. Increased risk of hospital admission for asthma in children from short-term exposure to air pollution: case-crossover evidence from northern China [J]. *Front Public Health*, 2021, 9: 798746.
- [29] Chen Z, Zhang L, Ai T, et al. Air Pollution and Childhood Asthma Hospitalizations in Chengdu, China: A Time-Series Study. *Journal of Asthma and Allergy*. 2025;18: 229-243.
- [30] Lloyd CM, Saglani S. Early-life respiratory infections and developmental immunity determine lifelong lung health. *Nat Immunol*. 2023;24(8): 1234-1243.
- [31] Schramm W. The (human) respiratory rate at rest. *Journal of Mathematical Biology*. 2022;85(5): 60.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 顾心怡)