调查研究
Investigation

2014—2019 年临沂市日均气温、臭氧浓度与人民医院心血管疾病日门诊量的时间序列研究

冯美慧[1,2]，何群[1]，伯鑫[3]，刘厚凤[1]，吴鑫[4a]，杨静[4b]，李冬[4c]，魏敏[1]

1. 山东师范大学地理与环境学院，山东 济南 250358
2. 临淄区生态环境技术服务中心，山东 淄博 255499
3. 北京化工大学化学工程学院/中国工业碳中和研究院，北京 100029
4. 临沂市人民医院 a. 设备与医学工程部 b. 网络与信息部 c. 睡眠癫痫中心，山东 临沂 276000

摘要：

[背景] 暴露于高浓度臭氧（O_3）环境可导致心血管系统疾病（CVD）的高发病率及死亡率，但目前国内关于温度与 O_3 联合效应对疾病的影响研究较少。

[目的] 明确气温及 O_3 污染对临沂市心血管疾病人群的短期暴露效应。

[方法] 本研究基于 2014—2019 年临沂市 O_3 浓度监测数据、CVD 患者日常门诊数据及小时与日均空气质量数据，采用分布滞后非线性模型（DLNM）研究温度与 O_3 对临沂市人群 CVD 的相对风险（RR）和滞后效应，探讨温度与 O_3 交互作用对临沂市人群 CVD 门诊量的影响。

[结果] O_3 暴露对人群 CVD 影响呈非线性并存在滞后性，O_3 浓度为 100 μg·m^{-3} 时，RR 峰值为 [1.39（95%CI：1.25~1.55）]，O_3 重污染天（>180 μg·m^{-3}）心血管门诊量增加。性别与年龄对 CVD 的修饰效应表明 O_3 暴露对男性 CVD 门诊量增加的 RR（95%CI）值 [1.40（1.26~1.58）] 略高于女性 [1.38（1.22~1.57）]；对 >65 岁人群 [1.38（1.02~1.55）]RR 值高于≤65 岁人群 [1.22（1.06~1.38）]，因而男性及 65 岁以上人群对 O_3 暴露的心血管疾病风险更为敏感。温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应表明，暖季 O_3 在低、中、高浓度时均呈现较高的 CVD 门诊量；冷季 O_3 在低、中浓度（P_{25}，P_{50}）且累积滞后 1~3 天（lag01~lag03）时的门诊量增加有统计学意义，但 RR 值低于暖季。

[结论] O_3 污染可增加人群心血管疾病门诊就诊率，且存在性别及年龄修饰。气温对 O_3 暴露的心血管疾病风险存在修饰效应。暖季高温及高浓度 O_3 暴露会增加人群 CVD 门诊量，且 RR 值远高于冷季低温的影响。冷季低温条件下，O_3 暴露浓度在较低值时门诊量较高，冷季低温对人群 CVD 门诊量的影响高于 O_3。

关键词：臭氧；气温；心血管疾病；分布滞后非线性模型；临沂市

Associations between daily outpatient visits of cardiovascular diseases in People's Hospital and local temperature, ozone concentration in Linyi from 2014 to 2019

FENG Meihui[1,2], HE Qun[1], BO Xin[3], LIU Houfeng[1], WU Xin[4a], YANG Jing[4b], LI Dong[4c], WEI Min[1] (1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Linzi District Ecological and Environmental Technology Service Center, Zibo, Shandong 255499, China; 3. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology/China Institute of Industrial Carbon Neutrality, Beijing 100029, China; 4. a. Department of Equipment and Medical Engineering b. Department of Network and Information c. Sleep Epilepsy Center, Linyi People's Hospital, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract:

[Background] Exposure to high concentration of ozone (O_3) can lead to elevated morbidity and mortality due to cardiovascular diseases (CVD). Few studies in China are available on the combined effects of temperature and O_3 on CVD.

[Objective] To clarify the short-term exposure effects of temperature and O_3 pollution on residents with cardiovascular diseases in the Linyi City.

[Methods] Based on the O_3 concentration monitoring data, daily outpatient visit data of CVD,

CC BY NC ND

DOI 10.11836/JEOM24172

基金项目
国家自然科学基金面上项目（42075183）

作者简介
冯美慧（1996—），女，硕士生；
E-mail：fengmeihui1996@163.com

通信作者
魏敏，E-mail：minwei@sdnu.edu.cn

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 2024-04-28
录用日期 2024-11-21

文章编号 2095-9982(2025)01-0038-11
中图分类号 R13
文献标志码 A

▸本文链接、作者贡献申明
www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24172

▸引用
冯美慧，何群，伯鑫，等. 2014—2019 年临沂市日均气温、臭氧浓度与人民医院心血管疾病日门诊量的时间序列研究 [J]. 环境与职业医学，2025，42（1）：38-48.

Funding
This study was funded.

Correspondence to
WEI Min, E-mail: minwei@sdnu.edu.cn

Editorial Board Members' authorship No
Ethics approval Obtained
Competing interests None declared
Received 2024-04-28
Accepted 2024-11-21

▸ Link to this article, author contribution statement
www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24172

▸ To cite
FENG Meihui, HE Qun, BO Xin, et al. Associations between daily outpatient visits of cardiovascular diseases in People's Hospital and local temperature, ozone concentration in Linyi from 2014 to 2019[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(1): 38-48.

中国知网 https://www.cnki.net

and hourly and daily air quality data in Linyi City from 2014 to 2019, a distributed lag non-linear model (DLNM) was used to study the relative risks (RR) and lag effects of temperature and O_3 on the outpatient visits of CVD in Linyi City, and the effects of the interaction between temperature and O_3 on cardiovascular diseases were also examined.

[Results] The lag effect of O_3 exposure on CVD was non-linear, with a peak RR (95%CI) value [1.39 (1.25, 1.55)] at O_3 concentrations of 100 μg·m^{-3} and a significantly higher risk of CVD on the days of high O_3 concentration (> 180 μg·m^{-3}). The modifying effects of gender and age on CVD showed that the RR (95%CI) was greater for males [1.41 (1.26, 1.58)] than for females [1.38 (1.22, 1.57)], and higher for those aged > 65 years [1.38 (1.02, 1.55)] than those aged ≤65 years [1.22 (1.06, 1.38)]. Males and adults older than 65 were more sensitive to O_3 exposure. The modifying effect of temperature on CVD combined with O_3 exposure suggested that the risk associated with warm-season O_3 exposure was present across all concentration levels. In cold season, the RR of O_3 exposure was significant at low and medium concentrations (P_{25}, P_{50}) at 1-3 days of cumulative lag exposure (lag01–lag03), whereas the RR value was lower than that in the warm season.

[Conclusion] O_3 pollution poses an increased risk of outpatient visit due to CVD in Linyi, with variations observed based on gender and age. The impact of O_3 exposure on CVD is modulated by air temperature. Specifically, elevated temperature combined with high O_3 concentration during warm season escalate the outpatient visits due to CVD, with the outpatient visits being substantially higher than that observed in cold season at lower temperatures. Conversely, in cold season at lower temperatures, the outpatient visits associated with O_3 exposure is more pronounced at lower temperatures. Furthermore, the effect of low temperatures in cold season on CVD surpasses that of O_3 exposure.

Keywords: ozone; air temperature; cardiovascular disease; distributed lag non-linear model; Linyi

近年来，我国夏季臭氧（ozone, O_3）污染问题日益严重，流行病学和临床研究均表明暴露于高浓度 O_3 环境可导致心血管系统疾病（cardiovascular disease, CVD）发病率及死亡率升高[1–3]，长期和短期暴露都会增加 CVD 的风险[4–6]。全球疾病负担研究（Global Burden of Disease, GBD）表明，2019 年中国 CVD 死亡人数为 458.43 万例，占总死因的 43.04%，已成为我国居民死亡的首要原因[7–8]。由于 CVD 具有高患病率、高致残率和高死亡率的特点，O_3 暴露导致的人群 CVD 疾病加剧了居民和社会经济负担，已成为重大的公共卫生问题[9–10]。

在 O_3 对 CVD 的影响方面，我国目前进行的大规模队列研究表明，长期暴露于高浓度 O_3 环境与 CVD 发病率正相关，可进一步导致 CVD 死亡率增加[11–13]，且不同地区和不同性别间存在差异[14–16]。O_3 暴露导致的 CVD 超额死亡率还表现在与夏季高温热浪的协同作用，暴露于高浓度 O_3 和热浪环境可能会导致 CVD 发病率及死亡率的上升[17–19]。高温联合 O_3 可使人群死亡率急剧增加，尤其对老年人群和 CVD 等慢性病患者影响更大[20]。山东省近年来 O_3 浓度呈上升趋势，O_3 暴露对居民急性心血管健康及温度影响下 O_3 暴露对人群 CVD 的影响报道较少，本研究的结果可为后续 O_3 健康风险评估和相关环境健康政策的制定提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源及质控

临沂市位于山东省东南部（34°22′~36°13′ N，117°24′~119°11′ E），人口众多、工业门类齐全且结构偏重工业，是北方大气污染较严重的城市之一，大气污染问题在我国中小城市中具有典型性。门诊数据来自临沂市人民医院，含 2014—2019 年 CVD 患者的日常门诊信息，包括患者年龄、性别、就诊时间、病因主诊断等。本研究已通过临沂市人民医院科研伦理审查（编号：202412-H-033）。原始门诊数据资料按照国家三级甲等医院标准进行规范化管理和检查，并由门诊资料管理人员与信息管理人员对门诊数据进行筛选，剔除门诊信息不全、重复门诊和诊断不清的病例。门诊数据处理依据国际疾病分类标准第十版（ICD-10）进行疾病分类，筛选心血管疾病（I05~I52）、高血压（I10~I15）、急性心肌梗死（I21~I23）、其他缺血性心脏病（动脉粥样硬化、冠脉供血不足、心绞痛等）（I20、I24、I25）门诊病历为健康效应终点[21]。最后，根据患者家庭住址信息剔除非临沂市居民数据，确保患者为常住居民。

大气污染物包括六项指标：细颗粒物（fine particulate matter, $PM_{2.5}$）、可吸入颗粒物（particulate matter with median aerodynamic diameter ≤10 μm, 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）、O_3，数据来源于山东省生态环境检测中心（http://www.sdem.org.cn/sy/），包括 4 个国控站和 4 个省控站数据，经环境保护部门质量控制。其中，O_3 浓度为最大 8 h 滑动平均值。气象数据，包括气温、气压、相对湿度、风速等气象数据来源于中国气象局临沂市大气边界层观测

中国知网 https://www.cnki.net

站，由气象部门进行质控。缺失数据除了采用真气网数据补充外（https://www.zq12369.com），另外采用交替最小二乘下的低秩矩阵插补算法，对监测数据中存在的缺失数据进行插补缺失值，以保证计算结果的准确性和有效性[22]。

1.2 性别年龄及污染物不同浓度的分层统计及温度修饰效应

2014—2019 年 CVD 疾病门诊量按照季节变化划分为暖季（4—9 月）和冷季（10 月—次年 3 月）两个层次，按照性别分为男、女两个层次，按照年龄分为≤65 岁和>65 岁两个层次。采用 SPSS 20.0 对六项污染物、气象数据及 CVD 数据求取年平均值、日平均值（mean）、标准差（standard deviation, SD）、最大值（maximum, Max）、最小值（minimum, Min）和四分位数（P_{25}、P_{50}、P_{75}、P_{95}），明确数据分布特征，计算冷暖季、性别及年龄分层下 O_3 对 CVD 门诊量的相对风险（relative risk, RR）及滞后效应。针对温度的季节性变化，在冷暖季分别开展 O_3 健康影响分析，进一步探讨不同温度影响下 O_3 暴露的人群 CVD 相对风险，明确温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应。

1.3 分布滞后非线性模型（distributed lag non-linear model, DLNM）

采用基于泊松分布的 DLNM 模型定量评估不同 O_3 浓度、不同温度对 CVD 的影响。在构建 O_3 人群暴露的相对风险模型时为将 O_3 作为主因素单独建模，O_3 与每日 CVD 门诊量连接，其他因素均以自然样条函数的形式纳入模型中作为混杂因素。为控制时间变量的长期趋势，将时间变量以自然样条函数的形式纳入模型，为控制日门诊量的“星期几效应”，星期几以哑变量的形式纳入模型，最终构建 O_3 人群暴露的相对风险模型如式（1）所示：

$$\begin{aligned} log\left[E\left(Y_i\right)\right] =& a + bbasis.O_{3ij} + ns\left(time_i, df\right) + \\ & ns\left(temp_i, df\right) + ns\left(rhum_i, df\right) + \\ & ns\left(ws_i, df\right) + \lambda DOW \end{aligned} \quad (1)$$

为评估温度对人群 CVD 的风险效应，构建温度对人群 CVD 相对风险模型表达式如式（2）所示：

$$\begin{aligned} log\left[E\left(Y_i\right)\right] =& a + bbasis.T_{ij} + ns\left(time_i, df\right) + \\ & ns\left(pmean_i, df\right) + ns\left(rhum_i, df\right) + \\ & ns\left(w_i, df\right) + \lambda DOW \end{aligned} \quad (2)$$

式中：Y_i 是第 i 天门诊人数；a 为截距；$basis.O_3$ 是通过 DLNM 模型中的“cross-basis”函数获得的所研究 O_3 因素的二维矩阵，b 为矩阵的系数；ns 为自然立方样条函数（natural cubic spline）；$time_i$ 是新设的时间序列变量，用于控制长期趋势，$temp$、$pmean$、$rhum$ 与 ws 分别为温度、气压、湿度与风速协变量；DOW_i 为第 i 天是星期几的哑变量；df 为自由度。通过调整相关变量的自由度，并结合模型的赤池信息量准则（Akaike Information Criterion, AIC），得到气象因素自由度为 3，时间变量自由度为 7/年，将最大滞后天数定为 14 d，并通过改变自由度及滞后时间检验模型的稳定性。

本研究中，危险度评估采用式（1）计算获得的回归系数 b 代入式（3）、（4）中，计算 O_3 浓度变化每个单位时，CVD 门诊量改变的百分比，即自然对数 RR 及 95%置信区间（95% confidence interval, 95%CI）[23]。

$$RR=e^{10b} \quad (3)$$

$$95\%CI=\exp\left(b\pm1.96S_b\right) \quad (4)$$

式中，b 为回归系数；CI 为 95%置信区间；S_b 为 b 的标准误。根据式（3）、（4）计算 RR 及其 95%CI 值，检验所得结果是否存在显著性差异。统计检验均采用双侧检验，检验水准 α=0.05。

数据分析及模型运行采用 R 语言（version, 4.0.5）版本中 mgcv 和 nlme 进行拟合。在分析温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应时，采用冷暖季分层法，同时将臭氧和温度作为主要变量因素建模，考虑温度与 O_3 暴露可能对人群 CVD 就诊量的增加存在协同作用。空气污染物、气象因素和门诊量采用偏态分布进行描述性分析，计算均值、标准差、最小值、最大值、中位数和四分位数间距（interquartile range, IQR）。采用 Spearman 相关分析污染物、气象因素与 CVD 日门诊量相关性。计算 CVD 门诊不同滞后期 RR 及 95%CI，检验所得结果是否存在显著性差异。统计检验均采用双侧检验，检验水准 α=0.05。

2 结果

2.1 临沂市人群 CVD 门诊量与 O_3 污染特征

2014—2019 年，临沂市人民医院共报告 CVD 疾病门诊病例 228 676 例，结果见表 1，心血管门诊量呈逐年递增趋势（图 1）。基于 6 年间临沂市人民医院 CVD 门诊病例，以 6 年间临沂市平均总人口数为基数，计算每十万人口 CVD 的门诊就诊量，得到 CVD 年均门诊量就诊率为 327/10 万。性别分布表明 CVD 疾病总门诊中男性 118 394 例（51.77%），女性 110 282 例（48.22%）。男性就诊量高于女性，可能与男性饮酒、吸烟等生活习惯导致的肥胖与心肺功能受损有关。年龄分布表明，CVD 总门诊量≤65 岁为 157 058 例（68.68%），

中国知网 https://www.cnki.net

>65 岁为 71410 例(31.22%)。2014—2019 年临沂市 O_3 与温度均呈年际周期性变化，呈现夏季高、冬季低的趋势，且 O_3 年均浓度呈上升趋势，2018 年 O_3 年均浓度最高(110.93 μg·m^{-3})。

表 1　2014—2019 年临沂市 CVD 门诊量、O_3 浓度与气象因素描述性统计

Table 1　Descriptive statistics of CVD outpatient visits, O_3 concentration and meteorological factors in Linyi from 2014 to 2019

指标	总数(n)	日均($\bar{x}\pm s$)	P_5	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{95}	Min	Max
总门诊量/例	228676	104.00±64.00	22	51	84	159	219	2	301
男性	118394	54.00±35.00	10	25	42	85	117	0	177
女性	110282	50.00±30.00	11	26	43	74	104	0	144
≤65岁	157058	72.00±43.00	16	36	59	106	148	1	219
>65岁	71618	33.00±22.00	6	14	25	50	73	0	107
$O_{3\text{-}8h}$ 日均浓度/(μg·m^{-3})		45.81±0.45	32.21	57.50	91.75	137.75	195.03	8.25	266.13
暖季(4—9月)		133.42±44.99	61.88	99.55	133.26	164.16	209.65	28.13	266.75
冷季(10月—次年3月)		67.51±32.30	23.64	45.34	60.86	86.63	127.93	8.25	251.25
日均温度/℃		14.72±0.23	−1.00	5.78	16.20	23.50	28.30	−10.70	33.00
暖季(4—9月)		22.80±4.77	13.50	20.20	23.50	26.20	29.60	5.10	33.10
冷季(10月—次年3月)		6.69±4.37	−2.20	1.70	5.80	11.60	17.60	−10.70	22.90
气压/hPa		1006.74±0.23	990.60	999.10	1006.70	1014.00	1022.90	974.20	1033.00
湿度/%		65.13±0.38	36.00	53.00	67.00	78.00	90.00	14.00	98.00
风速/(m·s^{-1})		5.25±0.04	2.95	4.00	5.00	6.10	8.94	1.50	15.70

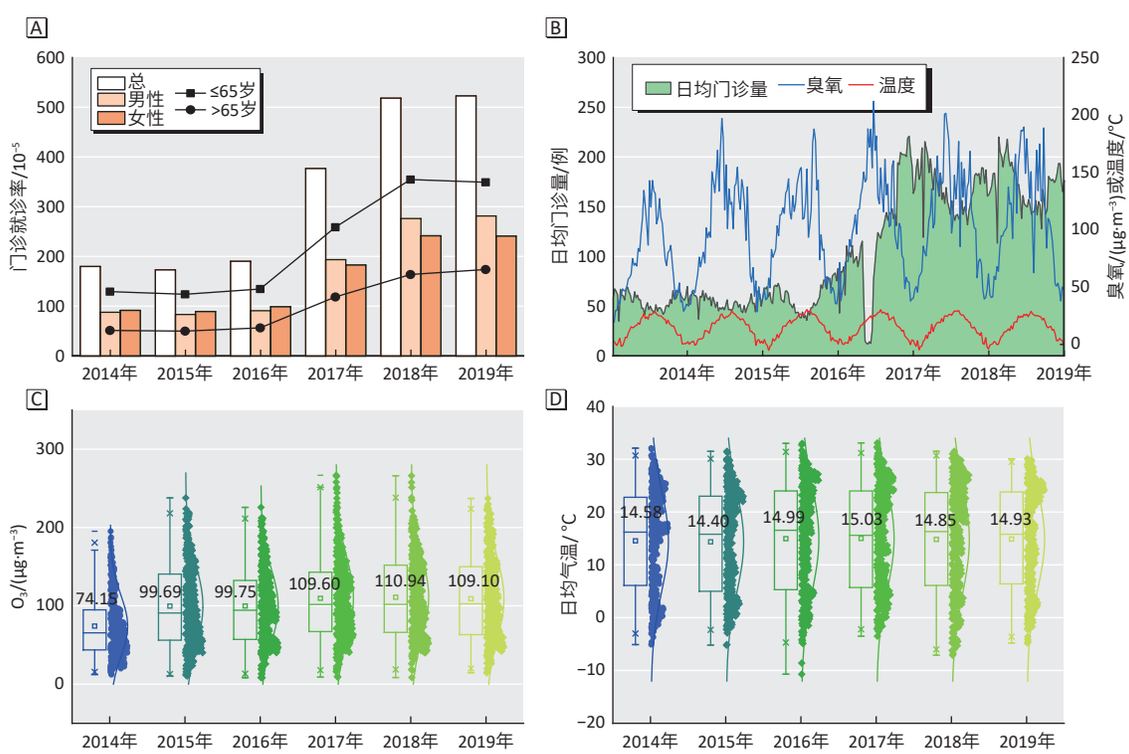


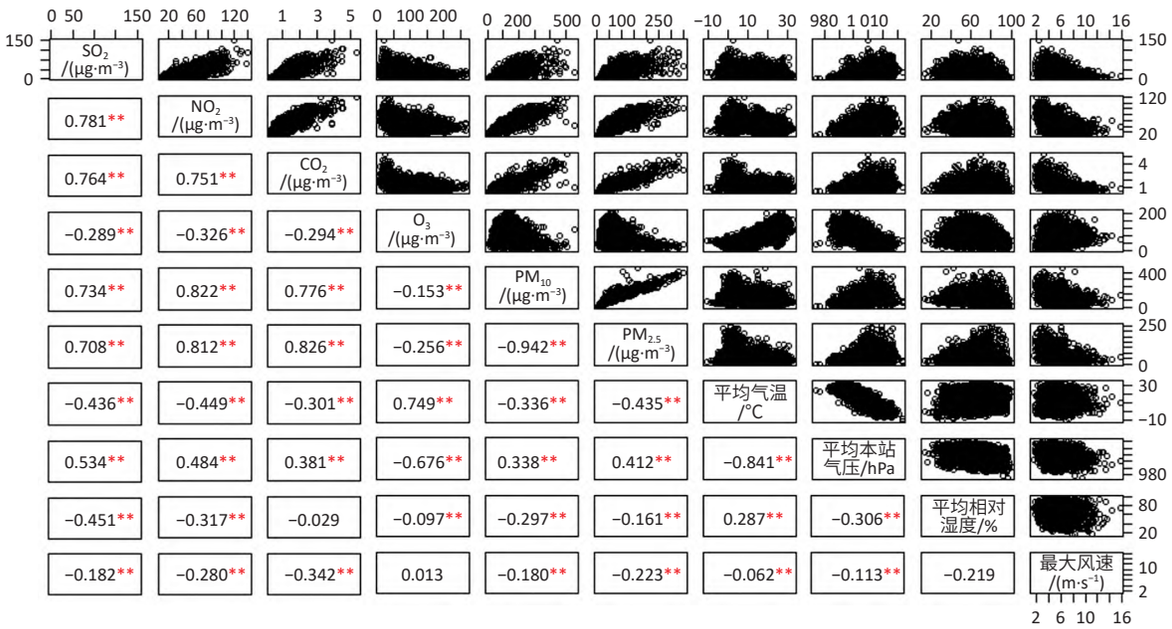
图 1　2014—2019 年 CVD 年均门诊就诊率(A)、CVD 日均门诊量与日均 O_3 浓度及日均温度时间序列(B)、O_3 年均浓度变化趋势(C)、日均气温年变化趋势(D)

Figure 1　Outpatient visits rate of CVD (A), time series of daily CVD outpatient visits, ozone concentration and temperature (B), annual average O_3 concentration (C), and air temperature (D) from 2014 to 2019

采用 Spearman 相关分析空气质量与气象数据的相关性，筛选与 CVD 相关的气象因素。在建模前对数据进行多重共线性诊断，剔除相关性高、共线性强的自变量。Spearman 相关表明 O_3 与其他大气污染相关性均较低($|r_s|<0.6$)，O_3 与 SO_2(r_s=−0.289，P<0.05)、NO_2(r_s=−0.326，P<0.05)、CO(r_s=−0.294，P<0.05)、PM_{10}

中国知网 https://www.cnki.net

(r_s=−0.153，P<0.05)、$PM_{2.5}$(r_s=−0.435，P<0.05)均呈负相关。O_3 与平均气压(r_s=−0.676，P<0.05)，平均气温(r_s=0.749，P<0.05)相关性高，但与湿度共线性低(r_s=−0.097，P<0.05)(图 2)。O_3 作用于 CVD 的过程并不是独立的，而是受多因素影响，其中与气象因素中温度相关性最高。本研究在控制其他因子影响的基础上，考虑气温与 O_3 对 CVD 的风险及两者协同作用对 CVD 的影响。



[注] **: P < 0.01。每小图代表不同环境因子，横纵坐标表示气象因子的浓度。

图 2 2014—2019 年临沂市大气污染物与气象因素的 Spearman 相关性(r)

Figure 2 Spearman correlation matrix between air pollutants and meteorological factors in Linyi City from 2014 to 2019 (r)

2.2 O_3 暴露的人群 CVD 相对风险及滞后效应

将 2014—2019 年临沂市日均 O_3 浓度与 CVD 日均门诊量及性别年龄分组下进行 DLNM 建模拟合，最大滞后时间为 14 d，绘制 O_3 与 CVD 风险及滞后效应三维图，结果表明 O_3 暴露对 CVD 风险呈非线性并存在滞后性，并选取单日滞后效应值最高的曲线单独分析(图 3)。日均总门诊量、分性别与年龄的模型表明随 O_3 浓度增加，单日滞后 2~4 d(lag2~lag4)、浓度为 100 μg·m^{-3} 时 RR 值较高，同时 O_3 浓度高于 180 μg·m^{-3} 时，随 O_3 浓度的升高女性及>65 岁人群 RR 值上升。

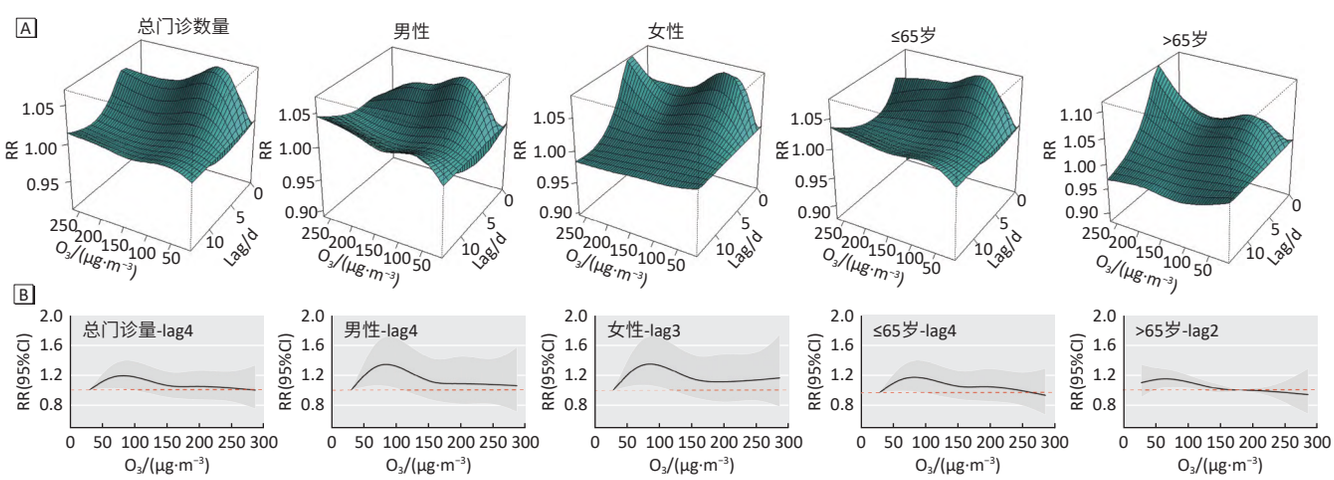


图 3 2014-2019 年临沂市 O_3 浓度对 CVD 总门诊量、不同性别、不同年龄人群的门诊量增加风险(A)及单日滞后效应风险值最高日的门诊量增加风险(RR 及其 95%CI 值)(B)

Figure 3 Relative risks (95%CIs) (A) and maximum single-day lag effects (B) of O_3 concentration on total, gender-specific, and age-specific CVD visits in Linyi from 2014 to 2019

中国知网 https://www.cnki.net

累积滞后效应一般随滞后天数的增加而 RR 值逐渐升高，研究以 14 d 为最终累积滞后天数进行建模分析，结果表明随着 O_3 浓度的升高，人群 CVD 风险总体呈现上升趋势。O_3 浓度在低浓度时即存在 CVD 门诊量增加风险，在高浓度臭氧污染天（O_3 浓度>180 μg·m^{-3}）时 CVD 风险显著上升（图 4）。分性别及年龄的风险效应均表明 O_3 高浓度（>180 μg·m^{-3}）时 RR 值显著上升。同时，在低于我国 O_3 日最大 8 h 滑动平均值二级标准（160 μg·m^{-3}）区间内，男性及女性 CVD 门诊量增加的风险效应趋势较一致，O_3浓度为 95 μg·m^{-3} 时男性 CVD 风险较高，RR 值为 1.40（95%CI：1.26~1.58），O_3 浓度为 115 μg·m^{-3} 时女性 CVD 风险较高，RR 值为 1.38（95%CI：1.22~1.57），RR 值男性大于女性。对>65 岁人群，在 O_3 浓度为 105 μg·m^{-3}CVD 风险较高，RR 值为 1.39（95%CI：1.22~1.58）。

不同 O_3 浓度下（P_{25}、P_{50}、P_{75}、P_{95}）CVD 的累积滞后（0、3、7、14 d）RR 值及 95%CI 见图 5。累积滞后效应在 lag03、lag07、lag014 时 RR 值显著，且随滞后天数增加，相对危险度增大。在低浓度（P_{25}）和中浓度（P_{50}）时存在累积滞后风险，表明低浓度 O_3 即存在 CVD 风险。性别分层结果显示 O_3 对男性 CVD 风险 RR 值略高于女性，以 O_3 P_{50} 浓度为例，lag07 时男性 RR 值为 [1.41（95%CI：1.24~1.56）] 略高于女性 [1.38（95%CI：1.22~1.57）]。年龄分层结果表明，O_3 对＞65 岁人群 CVD 风险值高于≤65 岁人群，以 O_3 P_{50} 浓度为例，lag014 时＞65 岁人群 RR 值为 1.38[95%CI：1.02~1.55]，高于≤65 岁人群 [1.22（95%CI：1.06~1.38）]。

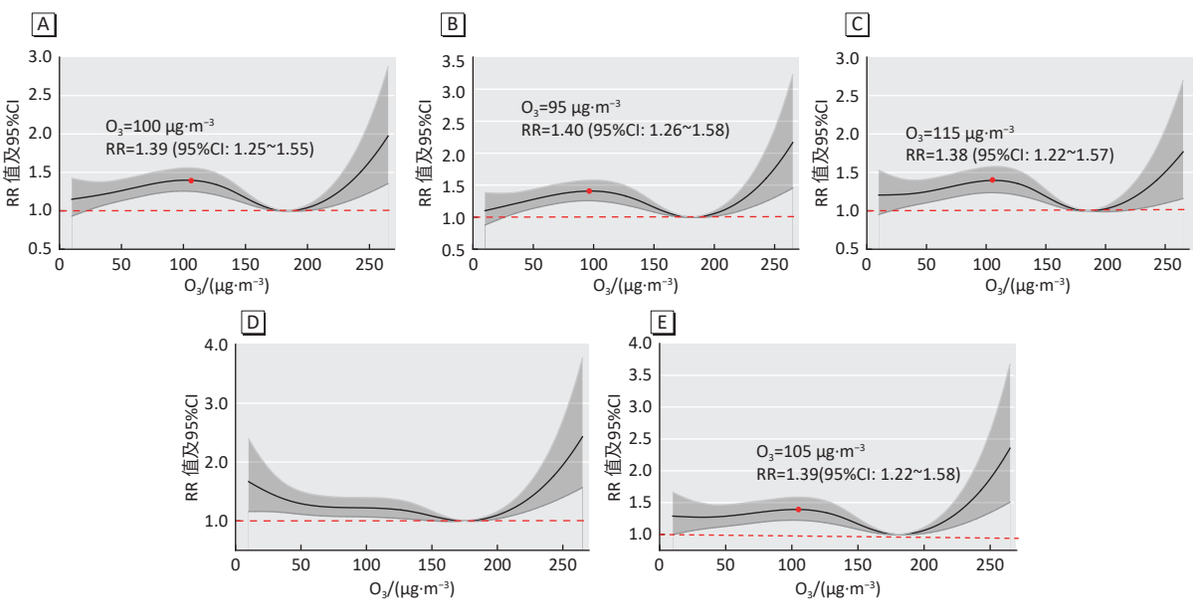


图 4 2014—2019 年临沂市 O_3 浓度对人群 CVD 总门诊量（A）、男性（B）、女性（C）、≤65 岁（D）和大于 65 岁（E）相对风险累积滞后效应曲线（lag014）

Figure 4 Effect curves of O_3 concentration for total (A), male (B), female (C), ≤ 65 years (D), and > 65 years (E) cardiovascular outpatient visits with a cumulative lag of 14 days

2.3 温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应

为评估气温对 O_3 CVD 风险的修饰效应，将全年分为暖季（4 月—9 月）和冷季（10 月—次年 3 月），采用分层分析方法纳入模型统计（图 6），将 O_3 和温度按照冷季和暖季分层，建立 DLNM 模型量化不同温度下臭氧暴露对门诊就诊量增加的相关风险效应修饰。在暖季，不同 O_3 浓度及温度（P_{25}、P_{50}、P_{75}、P_{95}）均对 CVD 风险增加有统计意义，且随滞后天数的增加，累积滞后风险升高。在冷季，温度对 CVD 的风险显著，但 O_3 在低浓度（P_{25}）和中浓度（P_{50}），累积滞后 1~3 d 时风险较高（lag01~lag03），并未呈现随滞后天数的增加风险值上升的趋势。

温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应表明，暖季气温与 O_3 对人群 CVD 就诊量的增加存在协同作用，表明臭氧和温度共同作用对心血管疾病门诊量产生正向增加的影响（图 7）。在暖季，以夏季为例（17 ℃~34 ℃），随 O_3 浓度升高，CVD 总门诊量呈上升趋势，浓度>125 μg·m^{-3} 时风险值升高；日均温度为 25 ℃时，CVD 门诊量最高。在暖季，O_3 浓度相同，O_3 与温度协同暴露对男性最高 CVD 门诊量（70 人/d）的影响高

中国知网 https://www.cnki.net

于女性(60 人/d)，对>65 岁人群最高 CVD 门诊量(90 人/d)的影响高于≤65 岁人群(40 人/d)。在冷季，以冬季为例(−10 ℃~13 ℃)，O_3 浓度升高，CVD 总门诊量受 O_3 浓度影响较小，O_3 浓度为 50 μg·m^{-3} 时，CVD 总门诊量最高。随温度升高(−10 ℃~13 ℃)，CVD 总门诊量呈上升趋势。综上，温度对 O_3 暴露 CVD 风险的修饰效应表明暖季 O_3 浓度的升高对总 CVD 门诊量的影响高于温度的影响，对男性心 CVD 门诊量影响高于女性，对>65 岁人群 CVD 门诊量影响高于≤65 岁。冬季 O_3 浓度较低时(<50 μg·m^{-3})，CVD 门诊量较高，O_3 对女性及>65 岁人群 CVD 风险较高。

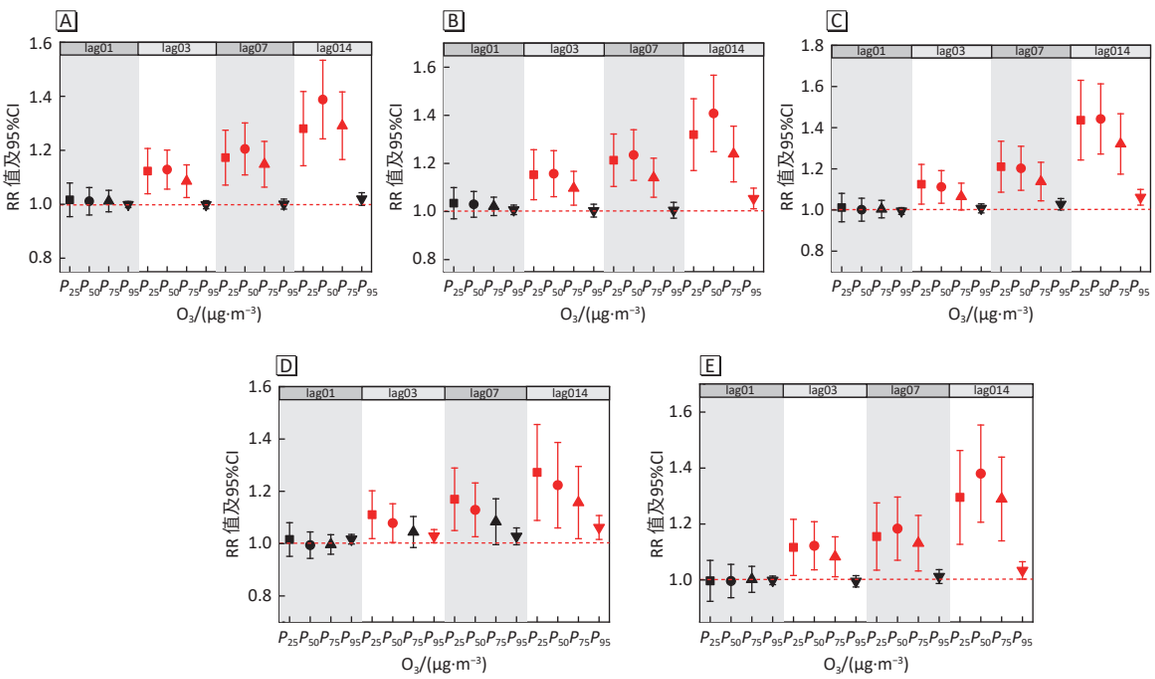
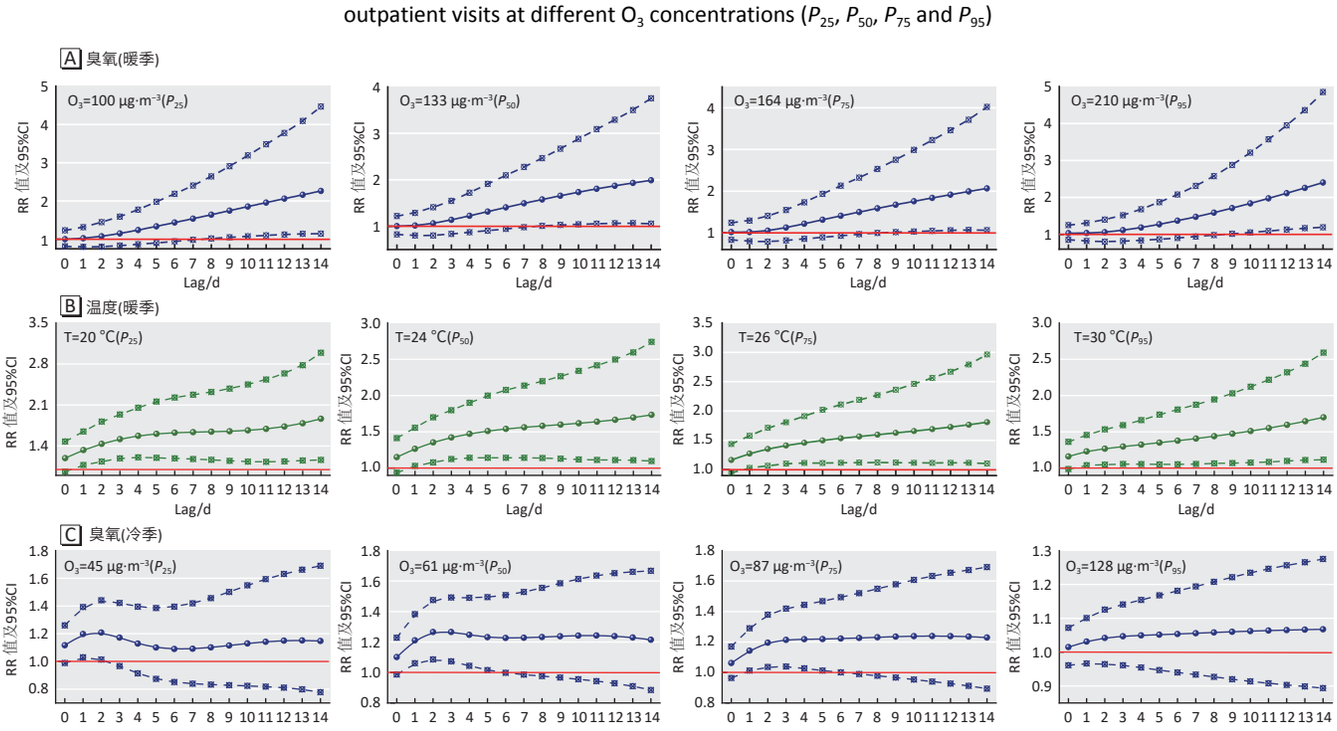
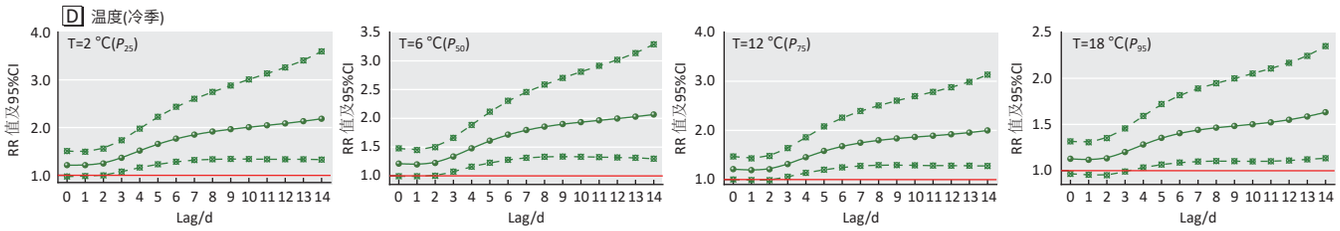


图 5　不同 O_3 浓度下(P_{25}、P_{50}、P_{75}、P_{95})CVD 总门诊量(A)、男性(B)、女性(C)、≤65 岁(D)和大于 65 岁(E)相对风险的累积滞后 RR 值及 95%CI

Figure 5　Cumulative lagged RR values and 95%CI of CVD for total (A), male (B), female (C), ≤ 65 years (D), and > 65 years (E) cardiovascular outpatient visits at different O_3 concentrations (P_{25}, P_{50}, P_{75} and P_{95})



中国知网 https://www.cnki.net



[注] 实线表示最优线性预测曲线，虚线表示置信区间内效应曲线，RR=1.0 为基准参考线。

图 6 暖季不同 O_3 浓度(A)、温度(P_{25}、P_{50}、P_{75}、P_{95})(B)，和冷季不同 O_3 浓度(C)、温度(P_{25}、P_{50}、P_{75}、P_{95})(D)下 CVD 的累积滞后效应及 95%CI

Figure 6 Cumulative lag effects of different O_3 concentrations and temperatures (P_{25}, P_{50}, P_{75}, P_{95}) on CVD in warm (A, B) and cold seasons (C, D)

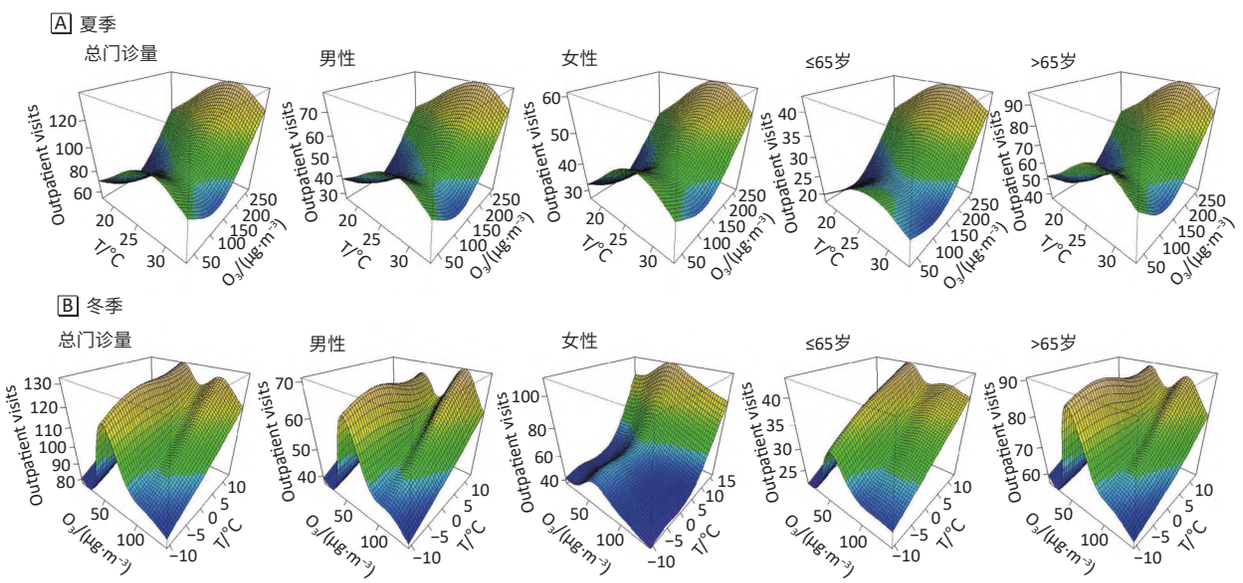


图 7 温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应，以夏季(A)和冬季(B)为例代表暖季和冷季的影响

Figure 7 Modifying effects of temperature on CVD outpatient visits caused by O_3 in summer (A) and winter (B)

3 讨论

本研究基于时间序列的 DLNM 模型探讨温度及 O_3 水平对临沂市不同年龄及性别人群 CVD 门诊量的影响。研究结果表明不同 O_3 浓度均对 CVD 门诊量增加产生影响，温度对 O_3 暴露的 CVD 门诊量增加存在修饰效应。暖季低浓度 O_3 即产生 CVD 门诊量增加风险，随滞后天数增加累积滞后风险上升。O_3 暴露对 CVD 呈非线性影响并存在滞后性，高浓度 O_3 暴露下(>180 μg·m^{-3})CVD 门诊量增加风险 RR 值升高。O_3 暴露对男性 CVD 相对风险值 RR [1.41(95%CI：1.26~1.58)]略高于女性 [1.38(95%CI：1.22~1.57)]，对≥65 岁人群 [1.38(95%CI：1.02~1.55)]，风险高于<65 岁人群 [1.22(95%CI：1.06~1.38)]。O_3 人群暴露的风险差异可能与生理特征及生活与工作方式有关，如男性吸烟率较高、室外活动时间较长等[24]。北京市和南京市相关研究均发现 O_3 对男性心脑血管疾病死亡的影响较高[25–26]。谷少华等[27]研究了 O_3 对心脑血管疾病急救的短期影响及季节差异，发现暖季 O_3-8h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，当日心脑血管疾病急救人次增加 1.17%(95%CI：0.21%~2.13%)，男性风险高于女性。相关研究表明 O_3 暴露浓度与人体血小板活化(凝血的危险因素)和血压的升高相关，是 O_3 影响心血管系统健康的机制之一，对不同分组人群的影响，可能与人群生理因素有关[28]。朱欢欢等[10]对环境空气 O_3 暴露的慢性健康效应的研究发现男性慢性 CVD 群体中超额死亡数大于女性群体，可能与男女劳动方式与劳动强度不同导致的呼吸速率与皮肤暴露程度有关[29]。孙贝贝等[30]发现 O_3 暴露可提高健康老年人肺部炎症水平，诱发氧化应激，同时还可降低肺功能。芦静等[5]对包头市大气 O_3 污染对人群 CVD 死亡的急性效应的研究表明>65 岁人群对 O_3 暴露的疾病风险高于≤65 岁人群。本研究结果与上述结果较一致，不同 O_3 浓度下的 CVD 风险效应

中国知网 https://www.cnki.net

随累积滞后天数增加，相对危险升高，且对男性危险度高于女性，对＞65 岁人群危险度大于≤65 岁人群。O_3 暴露对人群 CVD 的影响存在差异性，与不同地区差异和气象因素差异，O_3 污染程度有关。作为典型的中小工业城市，临沂市近年来城市化发展进程迅速，夏季 O_3 污染浓度呈逐年上升趋势，其人群健康风险值得进一步探讨。

不同 O_3 浓度及温度对 CVD 的累积滞后效应表明，暖季低浓度 O_3 即可对 CVD 产生风险，随滞后天数增加累积滞后风险显著上升。研究表明，高温“热浪”对人群死亡率呈现“收获效应”，由于高温引起的死亡增加可以被随后几天或几个星期内的死亡减少而补偿[31]。这种“收获效应”另一方面体现在高温“热浪”对人群死亡率的“滞后效应”，高温不仅影响当日死亡率同时还会对后几天的疾病死亡率产生影响[32]。在评价温度的死亡效应时，多采用 2—4 周的最大滞后天数。若采用较短的最大滞后天数会低估冷效应的影响，不能发现潜在的“收获效应”，造成对热效应的高估[33]。本研究采用的最大滞后天数为 2 周，累积滞后效应在 lag03、lag07、lag014 时 RR 值显著，且随滞后天数增加，相对危险度增大。温度对 O_3 所致人群 CVD 门诊量的修饰效应表明，O_3 对 CVD 的累积滞后效应在暖季更为明显，温度较高时风险值较高。O_3 与温度协同暴露对 CVD 的影响呈非线性，对男性 CVD 门诊量影响高于女性，对>65 岁人群 CVD 门诊量影响高于≤65 岁人群。暖季，气温与 O_3 对人群 CVD 的影响呈协同作用，高温高浓度 O_3 暴露时，人群 CVD 风险显著上升。梁婷婷等[34]对石家庄市高温和 O_3 对高血压门诊量的正向交互作用也与本研究结果较一致，高温与 O_3 共同暴露使人群 CVD 风险显著上升。Li 等[35]采用时间分层病例交叉设计探讨了 2005—2013 年北京附近农村地区暖季 O_3 对心血管死亡率的影响，发现 O_3 浓度增加 10 μg·m^{-3} 导致心血管死亡率的相对危险值范围为 1.025~1.031。宋全全等[36]对高温下 O_3 与冠心病就诊人数的敏感性分析发现 O_3 浓度每增加 10 μg·m^{-3}，冠心病相对风险值由常温天气下的 0.123%增加到 0.440%。Shi 等[37]对 2013—2018 年中国 128 个区县温度对短期 O_3 暴露与非意外和特定原因死亡率的影响研究，发现高温显著增强了 O_3 对心血管死亡率的影响，与≤65 岁人群相比，>65 岁老年人在高温下非意外和 CVD 死亡率风险更高。芦静等[5]对包头市冬夏两季 O_3 对 CVD 死亡效应分析显示，O_3 的 CVD 风险在夏季更强，且对>65 岁人群比≤65 岁的影响更大，与本研究结果较一致。Atkinson 等[38]通过文献综述评估了 2015 年 4 个队列暖季 O_3 浓度对 CVD 的影响，表明有 3 个队列存在危险效应，最大值为 1.01（95%CI：1.00~1.02）。Ren 等[39]基于时间序列研究了美国 95 个大型社区 O_3 与温度对 CVD 死亡率之间的关系，发现每日 O_3 浓度最低和最高水平时心血管死亡率分别增加 1.17%和 8.31%，表明 O_3 浓度较低与较高时均存在 CVD 死亡风险，而本研究也发现冷季 O_3 浓度低时存在 CVD 高就诊量的现象。Chen等[40]对 2008—2009 年苏州地区日平均气温和 O_3 对死亡率的交互影响结果表明，O_3 对女性的影响在低温日较强，心血管死亡率增加 18.77%（95%CI：0.09%~40.95%），男性仅为 1.65%（95%CI：−3.21%~6.76%）。雷若倩等[41]对 2013—2017 年合肥市颗粒物与 O_3 对居民每日死亡关系的研究发现，O_3 对 CVD 有显著影响效应，在寒冷季节交互作用中，纳入 $PM_{2.5}$ 后，CVD 死亡风险从 2.9%增加至 4%，与寒冷季节 $PM_{2.5}$ 浓度较高有关，应考虑颗粒物与低温对 CVD 的协同效应。O_3 污染加重时会增加 CVD 死亡风险，即使在污染浓度较低下也存在健康风险[42]，但冷季 O_3 污染浓度较低，一般考虑颗粒物的影响，在冬季 O_3 污染低-中浓度下，颗粒物与低温协同作用对 CVD 的影响可能是 CVD 风险升高的主要原因。

大气污染物之间的相关性分析表明，O_3 与 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、CO、NO_2 之间均为负相关，空气中悬浮颗粒对阳光有遮蔽作用，降低了挥发性有机物与氮氧化物的光化学反应，进而减少了 O_3 的产生[5]。相关研究结果证实了 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、NO_2 与气温对人群死亡的交互作用，高温会增加 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 导致的非意外总死亡、CVD 死亡和呼吸系统疾病的死亡风险，低温条件下 SO_2、NO_2 对 CVD 死亡风险的影响更强[43]，但 O_3 与上述污染物复合暴露下的人群健康风险是否存在协同或抑制效应尚不明确。此外，受不同地域及城市社会经济水平和人口分布特征的影响，O_3 污染的人群敏感性差别较大，导致不同地域及经济条件下研究结果存在差异[44–45]。本研究主要探讨了日均气温、O_3 浓度对 CVD 日门诊量的暴露风险及协同效应，但对其他空气污染物（如 $PM_{2.5}$、NO_2 等）与 O_3 联合暴露的人群 CVD 日门诊量的暴露风险探讨较少。同时，其他社会经济因素，如家庭收入、教育水平、婚姻状况等，均可能会影响抽样暴露的人群 CVD 就诊量，进而影响结果的准确性。未来研究中纳入更多的混杂因素，包括多污染物因素联合暴露分析，社会经济因素的修饰效应，以提高研究结果的准确性。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献

[1] ZHANG J, CHEN Q, WANG Q, et al. The acute health effects of ozone and $PM_{2.5}$ on daily cardiovascular disease mortality: a multi-center time series study in China[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2019, 174: 218-223.

[2] SONG J, ZHU J, TIAN G, et al. Short time exposure to ambient ozone and associated cardiovascular effects: a panel study of healthy young adults[J]. Environ Int, 2020, 137: 105579.

[3] 尹春苗, 张莹, 胡文东, 等. 成都市 $PM_{2.5}$ 和臭氧交互作用对心脑血管疾病死亡人数的影响研究 [J]. 四川大学学报 (医学版), 2021, 52(6): 981-986.
YIN C M, ZHANG Y, HU W D, et al. Effects of interaction between $PM_{2.5}$ and O_3 8-h max on mortality of cardiovascular diseases in Chengdu[J]. J Sichuan Univ (Med Sci), 2021, 52(6): 981-986.

[4] TAJUDIN M A B A, KHAN F, MAHIYUDDIN W R W, et al. Risk of concentrations of major air pollutants on the prevalence of cardiovascular and respiratory diseases in urbanized area of Kuala Lumpur, Malaysia[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2019, 171: 290-300.

[5] 芦静, 张晓梅, 冯晓冬. 包头市大气臭氧污染对人群循环系统疾病死亡的急性效应 [J]. 环境与职业医学, 2019, 36(4): 381-387.
LU J, ZHANG X M, FENG X D. Acute effect of ambient ozone pollution on death from circulatory diseases in Baotou City[J]. J Environ Occup Med, 2019, 36(4): 381-387.

[6] YANG L, ZHU Y, ZHAO B, et al. Long-term cardiometabolic effects of ambient ozone pollution in a large Chinese population[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2023, 261: 115115.

[7] 何敏. 中国 96 个区/县大气 $PM_{2.5}$、NO_2 和 O_3 对人群死亡的急性效应及其交互作用 [D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2021.
HE M. Acute effeets of fine particulate matter, nitrogen dioxide and ozone on mortality and their interactions in the 96 districts/counties of China[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2021.

[8] ZHOU M, WANG H, ZENG X, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet, 2019, 394(10204): 1145-1158.

[9] 《中国心血管健康与疾病报告 2020》编写组. 《中国心血管健康与疾病报告 2020》概述 [J]. 中国心血管病研究, 2021, 19(7): 582-590.
The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Key points of report on cardiovascular health and diseases in China 2020[J]. Chin J Cardiovascular Res, 2021, 19(7): 582-590.

[10] 朱欢欢. 环境空气臭氧暴露的慢性健康效应研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
ZHU H H. Study on chronic health effects of ambient air ozone exposure[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2020.

[11] ZHU L, FANG J, YAO Y, et al. Long-term ambient ozone exposure and incident cardiovascular diseases: national cohort evidence in China[J]. J Hazard Mater, 2024, 471: 134158.

[12] LIU S, ZHANG Y, MA R, et al. Long-term exposure to ozone and cardiovascular mortality in a large Chinese cohort[J]. Environ Int, 2022, 165: 107280.

[13] 彭星宇, 王彦丁, 张新民, 等. 臭氧短期暴露与我国人群死亡之间关系的 meta 分析 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(12): 1391-1397.
PENG X Y, WANG Y D, ZHANG X M, et al. Meta-analysis of relationship between short-term ozone exposure and population mortality in China[J]. J Environ Occup Med, 2022, 39(12): 1391-1397.

[14] LIANG S, CHEN Y, SUN X, et al. Long-term exposure to ambient ozone and cardiovascular diseases: evidence from two national cohort studies in China [J]. J Adv Res, 2024, 62: 165-173.

[15] ZHAO L, LIANG H R, CHEN F Y, et al. Association between air pollution and cardiovascular mortality in China: a systematic review and meta-analysis[J]. Oncotarget, 2017, 8(39): 66438-66448.

[16] ZHANG X, YAN B, ZHOU Y, et al. Short-term health impacts related to ozone in China before and after implementation of policy measures: a systematic review and meta-analysis[J]. Sci Total Environ, 2022, 847: 157588.

[17] LIU J, VARGHESE B M, HANSEN A, et al. Heat exposure and cardiovascular health outcomes: a systematic review and meta-analysis[J]. Lancet Planet Health, 2022, 6(6): e484-e495.

[18] XU R, SUN H, ZHONG Z, et al. Ozone, heat wave, and cardiovascular disease mortality: a population-based case-crossover study[J]. Environ Sci Technol, 2024, 58(1): 171-181.

[19] ALEBIĆ-JURETIĆ A, CVITAŠ T, KEZELE N, et al. Atmospheric particulate matter and ozone under heat-wave conditions: do they cause an increase of mortality in Croatia?[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2007, 79(4): 468-471.

[20] 张夏琨, 况正中, 张书余. 模拟热浪期间突然强降温天气对高血压大鼠心血管系统影响的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(3): 36-46.
ZHANG X K, KUANG Z Z, ZHANG S Y. Effects of simulated heat waves with strong sudden cooling weather on the cardiovascular system of spontaneously hypertensive rats[J]. Sci Technol Eng, 2017, 17(3): 36-46.

[21] 贾云飞, 陈春静, 唐彦钊, 等. 南京市大气臭氧与人群循环系统疾病死亡的时间序列分析 [J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(1): 42-46.
JIA Y F, CHEN C J, TANG Y Z, et al. Association between ambient ozone and circulatory diseases mortality in Nanjing: a time-series analysis[J]. J Environ Health, 2020, 37(1): 42-46.

[22] 张波, 宋国君. 大规模空气质量监测数据缺失处理方法实证研究 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2078-2087.
ZHANG B, SONG G J. Research on the missing value methods for large-scale online air quality monitoring data[J]. China Environ Sci, 2022, 42(5): 2078-2087.

[23] 李骊. 广州市大气污染、气象与逐日人群死亡数的关系研究 [D]. 广州: 南方医科大学, 2015.
LI L. A study on the associations between ambient air pollution, meteorological factors and daily mortality in Guangzhou, China[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2015.

[24] CLOUGHERTY J E. A growing role for gender analysis in air pollution epidemiology[J]. Environ Health Perspect, 2010, 118(2): 167-176.

[25] 班婕, 李泖泖. 北京市不同度量方式下臭氧短期暴露人群急性健康效应研究 [J]. 环境与健康杂志, 2016, 33(4): 287-291.
BAN J, LI T T. Short-term effects of different ozone metrics on daily mortality in Beijing[J]. J Environ Health, 2016, 33(4): 287-291.

[26] 陈琦, 孙宏, 陈晓东, 等. 南京市臭氧短期暴露人群急性健康效应研究 [J]. 江苏预防医学, 2017, 28(4): 366-368,386.
CHEN Q, SUN H, CHEN X D, et al. Acute health impacts of ozone exposure on daily mortality in Nanjing[J]. Jiangsu J Prev Med, 2017, 28(4): 366-368,386.

[27] 谷少华, 陆蓓蓓, 王钢, 等. 臭氧对心脑血管疾病急救的短期影响及其季节性差异 [J]. 中国卫生统计, 2019, 36(1): 52-56.
GU S H, LU B B, WANG G, et al. Seasonal variation in the acute effect of ozone on emergency ambulance dispatches for cardiovascular diseases[J]. Chin J Health Stat, 2019, 36(1): 52-56.

[28] DAY D B, XIANG J, MO J, et al. Association of ozone exposure with car-

中国知网 https://www.cnki.net

diorespiratory pathophysiologic mechanisms in healthy adults[J]. JAMA Intern Med, 2017, 177(9): 1344-1353.

[29] 杨彦, 于云江, 杨洁, 等. 浙江沿海地区居民环境健康风险评价中涉水和涉气活动的皮肤暴露参数研究 [J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(4): 324-327.
YANG Y, YU Y J, YANG J, et al. Coastal residents' dermal exposure parameter in Zhejiang, China under water-related activity and air-related activity[J]. J Environ Health, 2012, 29(4): 324-327.

[30] 孙贝贝, 宋杰, 姜静, 等. 短期臭氧暴露致健康老年人呼吸系统效应的定组研究 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38(2): 125-131.
SUN B B, SONG J, JIANG J, et al. Respiratory effects of short-term exposure to ozone in a panel of healthy elderly[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(2): 125-131.

[31] 陈正洪, 杨桂芳, 扈海波. 气候变化背景下温度对人体健康影响研究进展 [J]. 中国公共卫生, 2014, 30(10): 1318-1321.
CHEN Z H, YANG G F, HU H B. Research progress on the impact of temperature on human health under the background of climate change[J]. Chin J Public Health, 2014, 30(10): 1318-1321.

[32] 吴珍, 金银龙, 徐东群. 热浪对健康的影响及其应对措施 [J]. 环境卫生学杂志, 2013, 3(3): 256-260.
WU Z, JIN Y L, XU D Q. Health impacts and specific measurements from heat wave[J]. J Environ Hyg, 2013, 3(3): 256-260.

[33] 张云权, 宇传华, 鲍俊哲. 平均气温、寒潮和热浪对湖北省居民脑卒中死亡的影响 [J]. 中华流行病学杂志, 2017, 38(4): 508-513.
ZHANG Y Q, YU C H, BAO J Z. Impact of daily mean temperature, cold spells, and heat waves on stroke mortality a multivariable Meta-analysis from 12 counties of Hubei province, China[J]. Chin J Epidemiol, 2017, 38(4): 508-513.

[34] 梁婷婷. 高温与臭氧对高血压病影响效应的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
LIANG T T. The study of effect of high temperature and ozone on hypertension[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

[35] LI Y, SHANG Y, ZHENG C, et al. Estimated acute effects of ozone on mortality in a rural district of Beijing, China, 2005–2013: a time-stratified case-crossover study[J]. Int J Environ Res Public Health, 2018, 15(11): 2460.

[36] 宋全全. 高温热浪与臭氧对冠心病的交互作用影响及机制研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
SONG Q Q. Study on the interactive effects and the related mechanism of high temperature heat wave and ozone on coronary heart disease[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

[37] SHI W, SUN Q, DU P, et al. Modification effects of temperature on the ozone–mortality relationship: a nationwide multicounty study in China[J]. Environ Sci Technol, 2020, 54(5): 2859-2868.

[38] ATKINSON R W, BUTLAND B K, DIMITROULOPOULOU C, et al. Long-term exposure to ambient ozone and mortality: a quantitative systematic review and meta-analysis of evidence from cohort studies[J]. BMJ Open, 2016, 6(2): e009493.

[39] REN C, WILLIAMS G M, MORAWSKA L, et al. Ozone modifies associations between temperature and cardiovascular mortality: analysis of the NMMAPS data[J]. Occup Environ Med, 2008, 65(4): 255-260.

[40] CHEN K, YANG H B, MA Z W, et al. Influence of temperature to the short-term effects of various ozone metrics on daily mortality in Suzhou, China[J]. Atmos Environ, 2013, 79: 119-128.

[41] 雷若倩. 2013 年到 2017 年合肥市大气污染物 $PM_{2.5}$ 和 O_3 与居民每日死亡关系的研究 [D]. 合肥: 安徽医科大学, 2019.
LEI R Q. Study on the association between ambient $PM_{2.5}$/O_3 and daily mortality in Hefei from 2013 to 2017[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2019.

[42] 国家心血管病中心空气污染与心血管疾病专家共识组. 空气污染与心血管疾病专家共识 [J]. 中国循环杂志, 2021, 36(1): 14-21.
Chinese Expert Consensus Writing Group on Air Pollution and Cardiovascular Disease, National Center for Cardiovascular Diseases. Chinese expert consensus on air pollution and cardiovascular disease[J]. Chin Circ J, 2021, 36(1): 14-21.

[43] 李秀, 方博. 大气污染物与气温交互作用对我国居民死亡影响的系统综述 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(9): 1031-1037,1044.
LI X, FANG B. Systematic review of synergistic effect between air pollutants and temperature on human mortality in China[J]. J Environ Occup Med, 2022, 39(9): 1031-1037,1044.

[44] BELL M L, ZANOBETTI A, DOMINICI F. Who is more affected by ozone pollution? A systematic review and meta-analysis[J]. Am J Epidemiol, 2014, 180(1): 15-28.

[45] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. Nature, 2015, 525(7569): 367-371.

(**英文编辑**：汪源; **责任编辑**：张晨晨)

(上接第 13 页)

[28] WANG Y, GAO X, LIU J, LYU B, LI J, ZHAO Y, et al. Exposure to emerging and legacy polyfluoroalkyl substances in the sixth total diet study—China, 2016-2019[J]. China CDC Wkly, 2022, 4(9): 168-171.

[29] ZHANG A, WANG P, LU Y, et al. Occurrence and health risk of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in seafood from Yellow Sea, China[J]. Sci Total Environ, 2019, 665: 1026-1034.

[30] JIN Q, SHI Y, CAI Y. Occurrence and risk of chlorinated polyfluoroalkyl ether sulfonic acids (Cl-PFESAs) in seafood from markets in Beijing, China[J]. Sci Total Environ, 2020, 726: 138538.

[31] 张恣意, 曹文成, 周妍, 等. 湖北某典型地区动物源食品中全氟及多氟烷基化合物的污染现状和膳食暴露评估 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 214-222.
ZHANG Z Y, CAO W C, ZHOU Y, et al. Pollution status and dietary exposure assessments of per- and polyfluoroalkyl substances in animal food from a typical area in Hubei Province[J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(20): 214-222.

[32] HEO J J, LEE J W, KIM S K, et al. Foodstuff analyses show that seafood and water are major perfluoroalkyl acids (PFAAs) sources to humans in Korea[J]. J Hazard Mater, 2014, 279: 402-409.

[33] IPCS. International Programme on Chemical Safety[R]. Geneva: World Health Organization, 2006.

(**英文编辑**：汪源; **责任编辑**：汪源)

中国知网 https://www.cnki.net