·调查报告与分析·

短期臭氧暴露与德州市急诊救护车调度关系时间分层病例交叉分析

刘菲[1]，王培杰[2]，曲一楠[1]，赵琦[1]，吴艳玲[1]，李发强[2]

1. 山东大学齐鲁医学院公共卫生学院流行病学系，济南 250012；
2. 德州市疾病预防控制中心，德州 253016
通信作者：李发强，E-mail：easternland@163.com；吴艳玲，E-mail：ling1984@sdu.edu.cn

【摘　要】目的 分析短期臭氧(O_3)暴露与山东省德州市急诊救护车调度(EAD)的关系，为从健康视角治理 O_3 污染和采取公共卫生干预措施提供科学依据。**方法** 收集山东省德州市 120 急救调度指挥中心 2020 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日记录的每日全因急诊救护车调度数据以及同期中国气象数据网和中国高分辨率高质量近地表空气污染物数据集中气象数据和污染物数据，按照呼叫地址匹配；采用时间分层病例交叉设计通过整合分布滞后非线性模型(DLNM)的条件 logistic 回归模型分析短期 O_3 暴露对德州市 EAD 的影响，并采用亚组分析探索脆弱人群。**结果** 德州市 2020 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日的 EAD 数量为 344 287 例次，病例天数为 1 096 d，匹配的对照天数为 3 728 d。在排除了平均气温和相对湿度的影响后，时间分层病例交叉分析结果显示，短期 O_3 暴露滞后 0～7 d 与 EAD 累积风险呈正相关，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个四分位数间距(*IQR*)，EAD 累积风险可升高 8%(*OR*=1.08, 95%*CI*=1.04～1.11)；单日滞后效应分析结果显示，短期 O_3 暴露对 EAD 风险的累积效应在滞后当天最大(*OR*=1.06, 95%*CI*=1.05～1.08)，2 d 内迅速减小，第 2～4 d 出现潜在收获效应。亚组分析结果显示，男性、女性、<35 岁、35～65 岁、>65 岁、冷季和暖季 O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 9%(*OR*=1.09, 95%*CI*=1.04～1.13)、6%(*OR*=1.06, 95%*CI*=1.01～1.11)、6%(*OR*=1.06, 95%*CI*=0.99～1.13)、6%(*OR*=1.06, 95%*CI*=1.01～1.11)、10%(*OR*=1.10, 95%*CI*=1.05～1.15)、4%(*OR*=1.04, 95%*CI*=1.01～1.07)和 7%(*OR*=1.07, 95%*CI*=1.04～1.11)。敏感性分析结果显示，短期 O_3 暴露滞后 8 d 和 9 d 时，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 8%(*OR*=1.08, 95%*CI*=1.04～1.11)和 8%(*OR*=1.08, 95%*CI*=1.05～1.12)；当模型中滞后维度的自由度为 5 和 6 时，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险均升高 7%(*OR*=1.07, 95%*CI*=1.04～1.11)；模型中额外调整气态污染物 NO_2 和 SO_2 后，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险分别升高 9%(*OR*=1.09, 95%*CI*=1.06～1.13)和 8%(*OR*=1.08, 95%*CI*=1.05～1.12)；改变模型中 O_3 最大滞后天数和滞后维度自由度以及在模型中调整气态污染物 NO_2、SO_2 的结果与主模型结果差异均无统计学意义(均 P>0.05)，模型具有稳健性。**结论** 短期 O_3 暴露可增加德州市 EAD 的风险，其中对男性、>65 岁人群以及暖季 EAD 的影响较大。

【关键词】 急诊救护车调度(EAD)；短期臭氧(O_3)暴露；关系；时间分层病例交叉分析；德州市

A time-stratified case-crossover analysis of the association between short-term ozone exposure and emergency ambulance dispatches in Dezhou city

LIU Fei[1], WANG Peijie[2], QU Yinan[1], ZHAO Qi[1], WU Yanling[1], LI Faqiang[2] (*1. Department of Epidemiology, School of Public Health, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan* 250012, *China*; *2. Dezhou Center for Disease Control and Prevention, Dezhou* 253016, *China*)
Corresponding authors: LI Faqiang, E-mail: easternland@163.com; WU Yanling, E-mail: ling1984@sdu.edu.cn

【Abstract】 Objective To analyze the association between short-term ozone (O_3) exposure and emergency ambulance dispatches (EAD) in Dezhou city, Shandong province, and to provide scientific evidence for O_3 pollution control and public health interventions from a health perspective. **Methods** Daily all-cause EAD data recorded by the Dezhou 120 Emergency Dispatch Command Center from January 1, 2020, to December 31, 2022, as well as meteorological data and pollutant data from the China Meteorological Data Network and the China High Air Pollutants dataset during the same period, were collected and matched according to the calling address. A time-stratified case-crossover design was adopted to analyze the impact of short-term O_3 exposure on EAD in Dezhou city by integrating a distributed lag non-linear model (DLNM) with a conditional logistic regression model. Subgroup analyses were conducted to explore vulnerable populations. **Results** The number of EAD in Dezhou city from January 1, 2020, to December 31, 2022, was 344 287, with 1 096 case days and 3 728 matched control days. After excluding the influence of average temperature and relative humidity, the time-stratified case-crossover analysis showed a positive correlation between short-term O_3 exposure

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1146678
基金项目：山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QH318)；山东省优秀青年基金(海外)(2022HWYQ-055)
第一作者：刘菲(2001—)，硕士在读，研究方向：环境流行病学。
收稿日期：2024-12-13　修回日期：2025-03-18　录用日期：2025-05-16
利益冲突：不存在　伦理审查：已获取　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

lagged 0–7 days and the cumulative risk of EAD. For every interquartile range (*IQR*) increase in the daily maximum 8-hour average O_3 concentration, the cumulative risk of EAD increased by 8% (*OR* = 1.08, 95%*CI*: 1.04–1.11). The single-day lag effect analysis showed that the cumulative effect of short-term O_3 exposure on EAD risk was greatest on the day of exposure (*OR* = 1.06, 95%*CI*: 1.05–1.08), decreased rapidly within 2 days, and a potential harvesting effect appeared on days 2–4. Subgroup analyses showed that for every *IQR* increase in the daily maximum 8-hour average O_3 concentration, the cumulative risk of EAD increased by 9% (*OR* = 1.09, 95%*CI*: 1.04–1.13) in males, 6% (*OR* = 1.06, 95%*CI*: 1.01–1.11) in females, 6% (*OR* = 1.06, 95%*CI*: 0.99–1.13) in the < 35 age group, 6% (*OR* = 1.06, 95%*CI*: 1.01–1.11) in the 35–65 age group, 10% (*OR* = 1.10, 95%*CI*: 1.05–1.15) in the > 65 age group, 4% (*OR* = 1.04, 95%*CI*: 1.01–1.07) in the cold season, and 7% (*OR* = 1.07, 95%*CI*: 1.04–1.11) in the warm season. Sensitivity analyses showed that with 8-day and 9-day lags in short-term O_3 exposure, the cumulative risk of EAD increased by 8% (*OR* = 1.08, 95%*CI*: 1.04–1.11) and 8% *(OR* = 1.08, 95%*CI*: 1.05–1.12), respectively, for every *IQR* increase in the daily maximum 8-hour average O_3 concentration. When the degrees of freedom for the lag dimension in the model were 5 and 6, the cumulative risk of EAD increased by 7% (*OR* = 1.07, 95%*CI*: 1.04–1.11) for every *IQR* increase in the daily maximum 8-hour average O_3 concentration. After additionally adjusting for gaseous pollutants NO_2 and SO_2 in the model, the cumulative risk of EAD increased by 9% (*OR* = 1.09, 95%*CI*: 1.06–1.13) and 8% (*OR* = 1.08, 95%*CI*: 1.05–1.12), respectively, for every *IQR* increase in the daily maximum 8-hour average O_3 concentration. Changing the maximum lag days of O_3 and the degrees of freedom of the lag dimension in the model, as well as adjusting for gaseous pollutants NO_2 and SO_2 in the model, did not result in statistically significant differences from the main model results (all $P > 0.05$), indicating the robustness of the model. **Conclusions** Short-term O_3 exposure can increase the risk of EAD in Dezhou city, with greater impacts on males, individuals over 65 years of age, and EAD during the warm season.

【**Keywords**】 emergency ambulance dispatches (EAD); short-term ozone (O_3) exposure; association; time-stratified case-crossover analysis; Dezhou city

随着中国工业化的发展和城市化进程的加速，氮氧化物和挥发性有机物的排放量不断增加，二者通过光化学反应导致臭氧（ozone, O_3）含量逐年升高，而 O_3 进入机体后可通过氧化损伤和炎性反应等损伤多种细胞和组织，如引起支气管炎症和气道高反应性以及诱发脑卒中等[1–2]。研究表明，急诊救护车调度（emergency ambulance dispatches, EAD）数据可以及时捕获急性健康事件，有助于捕捉大气污染物变化对健康影响的早期迹象[3]，并能开发早期预警评估系统。然而，既往关于 O_3 暴露与 EAD 关联的研究多集中在我国南方地区[4–5]，对北方城市大气 O_3 暴露与 EAD 之间关系的研究较少。《2022 中国生态环境状况公报》[6] 显示，近年来京津冀及周边地区 O_3 日最大 8 h 平均浓度的 P_{90} 为 179 μg/m^3，较 2021 年上升了 4.7%。山东省德州市是我国北方大气 O_3 污染的典型代表城市，为分析短期 O_3 暴露与德州市 EAD 的关系，从健康视角治理 O_3 污染和采取公共卫生干预措施提供科学依据，本研究收集德州市 120 急救调度指挥中心 2020 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日记录的每日全因急诊救护车调度数据以及同期中国气象数据网和中国高分辨率高质量近地表空气污染物数据集中气象数据和污染物数据，按照呼叫地址匹配，采用时间分层病例交叉设计通过整合分布滞后非线性模型（distributed-lag nonlinear models, DLNM）的条件 logistic 回归模型分析短期 O_3 暴露对德州市 EAD 的影响，并采用亚组分析探索脆弱人群。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源　收集德州市 120 急救调度指挥中心 2020 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日记录的每日全因急诊救护车调度数据，内容包括性别、年龄、呼救时间、呼救地址、主诉和初步诊断；通过中国气象数据网（https://data.cma.cn/）获取同期德州市气象数据（空间分辨率为 0.062 5°×0.062 5°），包括每日平均气温和相对湿度；从中国高分辨率高质量近地表空气污染物数据集（China High Air Pollutants, CHAP）[7–9] 获取同期大气 O_3、二氧化硫（sulfur dioxide, SO_2）和二氧化氮（nitrogen dioxide, NO_2）的日均栅格数据（空间分辨率为 0.01°×0.01°）。气象数据和污染物数据均按急诊救护车呼叫地址进行匹配。本研究经山东大学公共卫生学院伦理委员会审查批准（批号为：LL20221121）。

1.2 统计分析　采用时间分层病例交叉设计估计短期 O_3 暴露与德州市 EAD 的关系。该设计广泛应用于环境流行病学研究，基本原理是对时间进行分层后的双向匹配，有病例发生的一天定义为病例日，与病例日处在同一年、同一个月和同一个星期几的其他天定义为对照日，因此一个病例日可以前后随机匹配多个对照日[10]。该方法可以同时控制季节性与星期几效应等混杂因素消除时间趋势偏倚[11]，从而为进一步因果推断提供证据。在本研究中以调度当日为病例日，最终分析中包括了 1 096 个病例日和 3 728 个对照日，平均每个病例日对应 3～4 个对照日。考虑到大气污染物对

疾病的影响具有滞后效应，采用整合 DLNM 的条件 logistic 回归模型估计短期 O_3 暴露与 EAD 风险之间的暴露–反应关系，计算模型为：$\mathrm{Logit}(P_i) = \alpha_{\mathrm{Stratum}_{(i)}} + \mathrm{cb}(O_{3i}, \mathrm{lag}=7) + \mathrm{ns}(\mathrm{Temp}_i, 4) + \mathrm{ns}(\mathrm{RH}_i, 3)$ 。式中，P_i 是第 i 层数据的急救调度结局（病例组=1，自匹配对照组=0）；每个救护车调度案例（i）及其对应的对照组视为一个层（Stratum），$\alpha_{\mathrm{Stratum}_{(i)}}$ 为第 i 层的截距项；$\mathrm{cb}(O_{3_i})$ 为 O_3 的交叉基函数，用于拟合 O_3 的累积效应与滞后效应，其中，效应维度首先使用自然立方样条函数（natural spline，ns）、自由度为 4 捕捉潜在非线性趋势，如果呈近似线性，则使用线性函数以更好量化 O_3 暴露的剂量–反应关系，计算 O_3 每增加 1 个四分位数间距（inter-quartile range，*IQR*）所对应的 *OR* 值及其 95%*CI*；lag 为滞后时间，根据预分析结果和参考既往文献[12]，最长滞后时间为 7 d，滞后维度采用 ns 函数，自由度为 4；$\mathrm{ns}(\mathrm{Temp}_i, 4)$和$\mathrm{ns}(\mathrm{RH}_i, 3)$分别代表平均温度和相对湿度的 ns 函数，滞后时间与 O_3 一致，自由度分别为 4 和 3，用于控制其潜在的混杂效应。为了探索脆弱人群，本研究将救护车调度案例按照性别、年龄和冷暖季进行了亚组分析，并根据公式 $z = (E_1 - E_2)/\sqrt{SE(E_1)^2 + SE(E_2)^2}$ 评估组间效应是否具有统计学差异[13]。式中，*E* 为效应的点估计值，*SE* 为标准误。此外，本研究还在主模型的基础上分别调整最大滞后天数为 8 和 9 d、调整滞后天数自由度为 5 和 6 以及额外调整其他污染物 SO_2 和 NO_2 进行敏感性分析以检验模型的稳健性。本研究采用 R 4.3.3 软件进行统计分析，其中，条件 logistic 回归采用“survival”包，DLNM 采用“dlnm”包。检验水准为双侧检验 $\alpha = 0.05$。

2 结 果

2.1 基本情况（表 1） 德州市 2020 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日的 EAD 数量为 344 287 例次，病例天数为 1 096 d，匹配的对照天数为 3 728 d。德州市 344 287 例次 EAD 中，男性 182 935 例次（53.14%），女性 153 083 例次（44.46%），不详 8 269 例次（2.40%）；年龄<35 岁 59 009 例次（17.14%），35～65 岁 136 910 例次（39.77%），>65 岁 138 967 例次（40.36%），不详 9 401 例次（2.73%）；冷季（11 月至次年 4 月）170 538 例次（49.53%），暖季（5—10 月）173 749 例次（50.47%）。病例日与对照日比较，平均温度、相对湿度以及 O_3、SO_2、NO_2 日均浓度差异均无统计学意义（均 *P*>0.05）。

表 1 德州市 2020—2022 年病例日与对照日气象因素和大气污染物分布情况比较（$\bar{x} \pm s$）
Table 1 Comparison of meteorological factors and air pollutants distribution between case days and control days in Dezhou city from 2020 to 2022 ($\bar{x} \pm s$)

项目	指标	病例日	对照日	*t*值	*P*值
气象因素	平均温度/℃	14.47±10.60	14.50±10.61	–0.079	0.937
	相对湿度/%	62.93±18.16	63.08±18.14	–0.235	0.814
大气污染物	O_3/(μg/m³)	118.27±50.65	118.22±50.62	0.029	0.977
	SO_2/(μg/m³)	12.46±4.59	12.45±4.61	0.066	0.948
	NO_2/(μg/m³)	30.09±14.16	30.10±14.23	–0.014	0.989

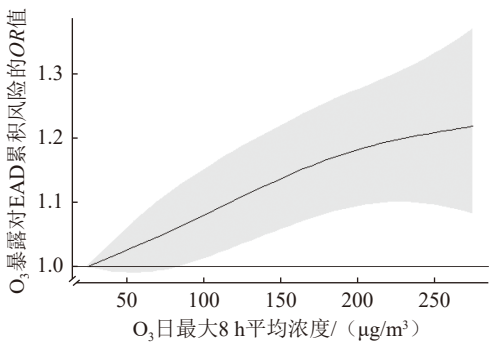
2.2 德州市 2020—2022 年气象因素和大气污染物相关性分析（表 2） 相关性分析结果显示，平均温度、相对湿度与 O_3 之间均呈正相关，平均温度、相对湿度、O_3 与 SO_2、NO_2 之间均呈负相关，SO_2 与 NO_2 之间呈正相关（均 *P*<0.05）。

表 2 德州市 2020—2022 年气象因素和大气污染物相关性分析（*r*）
Table 2 Correlation analysis (*r*) between meteorological factors such as average temperature , relative humidity and air pollutants such as O_3、SO_2、NO_2 in Dezhou city from 2020 to 2022

指标	平均温度	相对湿度	O_3	SO_2	NO_2
平均温度	1.000				
相对湿度	0.344 b	1.000			
O_3	0.842 b	0.061 a	1.000		
SO_2	–0.565 b	–0.554 b	–0.340 b	1.000	
NO_2	–0.604 b	–0.354 b	–0.519 b	0.761 b	1.000

注：a *P*<0.05；b *P*<0.01。

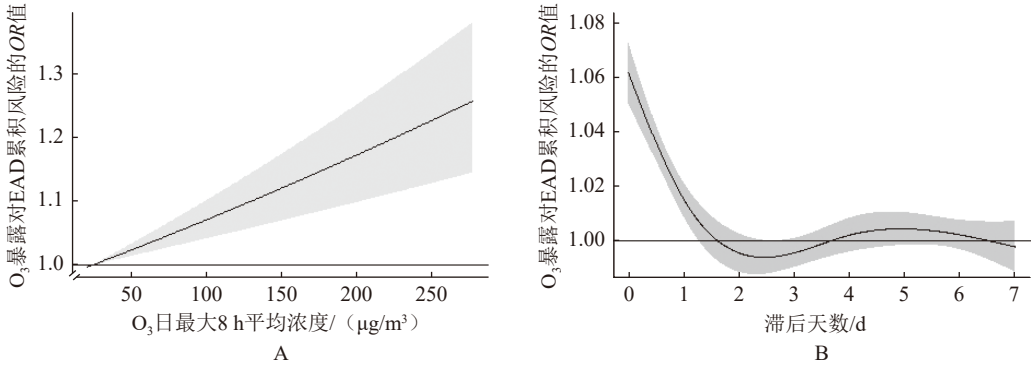
2.3 短期 O_3 暴露与德州市 EAD 关系（图 1、2）　将 7 d O_3 首先以 ns 函数纳入模型，结果显示，O_3 与 EAD 的暴露–反应关系近似线性，在滞后 7 d 内，EAD 的相对风险随着 O_3 暴露浓度的增加而增加（图 1）。为更好地展示结果，将 O_3 以线性函数重新纳入模型，在排除了平均气温和相对湿度的影响后，时间分层病例交叉分析结果显示，短期 O_3 暴露滞后 0～7 d 与 EAD 累积风险呈正相关，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可升高 8%（*OR*=1.08，95%*CI*=1.04～1.11）（图2A）；单日滞后效应分析结果显示，短期 O_3 暴露对 EAD 风险的累积效应在滞后当天最大（*OR*=1.06，95%*CI*=1.05～1.08），2 d 内迅速减小，第 2～4 d 出现潜在收获效应（图 2B）。



注：O_3 以 ns 函数纳入模型。

图 1　德州市 2020—2022 年大气 O_3 对 EAD 的累积风险

Fig. 1 Cumulative risk of atmospheric O_3 on emergency ambulance dispatches (EAD) in Dezhou city from 2020 to 2022



注：O_3 以线性函数纳入模型。

图 2　德州市 2020—2022 年大气 O_3 累积滞后 0～7 d 的 EAD 累积风险

Fig. 2 Cumulative risk of emergency ambulance dispatches (EAD) for cumulative lag 0–7 days of atmospheric O_3 in Dezhou city, 2020–2022

2.4 亚组分析　在排除了平均气温和相对湿度的影响后，亚组分析结果显示，男性人群和女性人群 O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 9%（*OR*=1.09，95%*CI*=1.04～1.13）和 6%（*OR*=1.06，95%*CI*=1.01～1.11）；<35 岁人群、35～65 岁人群和>65 岁人群 O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 6%（*OR*=1.06，95%*CI*=0.99～1.13）、6%（*OR*=1.06，95%*CI*=1.01～1.11）和 10%（*OR*=1.10，95%*CI*=1.05～1.15）；冷季和暖季 O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 4%（*OR*=1.04，95%*CI*=1.01～1.07）和 7%（*OR*=1.07，95%*CI*=1.04～1.11）。

2.5 敏感性分析　敏感性分析结果显示，短期 O_3 暴露滞后 8 d 和 9 d 时，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 8%（*OR*=1.08，95%*CI*=1.04～1.11）和 8%（*OR*=1.08，95%*CI*=1.05～1.12）；当模型中滞后维度的自由度为 5 和 6 时，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险均升高 7%（*OR*=1.07，95%*CI*=1.04～1.11）；模型中额外调整气态污染物 NO_2 和 SO_2 后，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险分别升高 9%（*OR*=1.09，95%*CI*=1.06～1.13）和 8%（*OR*=1.08，95%*CI*=1.05～1.12），改变模型中 O_3 最大滞后天数和滞后维度自由度以及在模型中调整气态污染物 NO_2、SO_2 的结果与主模型结果差异均无统计学意义（均 *P*>0.05），模型具有稳健性。

3 讨　论

本研究探讨了中国典型北方城市德州市大气短期 O_3 暴露与 EAD 之间的关系。结果显示，在排除了平均气温和相对湿度的影响后，德州市短期 O_3 暴露滞后 0～7 d 与 EAD 累积风险呈正相关，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可升高 8%（*OR*=1.08，95%*CI*=1.04～1.11），与既往研究中大气 O_3 暴露与呼吸和心血管系统 EAD 关系的结果相似。例如，一项日本的多城市研究结果显示，在 O_3 滞后当天对急性疾病 EAD 的影响最大，O_3 浓度每增加 20 μg/m^3，相关风险增加约 0.44%（95%*CI*=0.21%～0.68%）[14]；中国浙江省

的一项多中心病例交叉研究结果亦显示，大气 O_3 浓度在滞后 25～48 h 每增加 1 个 *IQR*，因中风急救入院的超额风险百分比为 3.48%（95%*CI*=1.40%～5.06%）[15]。但在中国四川省成都市进行的一项病例交叉研究中却并未观察到大气 O_3 暴露与哮喘相关 EAD 之间的关联[16]，这可能与成都市大气 O_3 浓度相对较低有关。同样地，Wang Y C 等[17]对中国台湾 2006—2015 年急救呼叫的分析结果显示大气 O_3 暴露与急救呼叫的关联并不显著。提示除暴露水平的差异外，经济水平和医疗资源的差异也是重要原因，这可能与经济水平发达地区的居民可以获得更及时和更多的预防医疗保健服务有关。

本研究结果显示，短期 O_3 暴露在滞后第 2～4 天对 EAD 会出现潜在收获效应，这可能是因为 O_3 的短期暴露可能对部分高危敏感人群产生健康损害，此类人群在 O_3 暴露当日或次日即发病而产生急诊呼叫，随后由于高危敏感人群已经提前就诊，反而在第 2～4 天出现了 EAD 下降的现象。为了寻找大气 O_3 暴露下的敏感人群，本研究将 EAD 按性别和年龄分组进行亚组分析，虽然未观察到短期 O_3 暴露与 EAD 之间的关联强度存在明显的性别差异，但男性较女性的点估计值更大。有研究表明，男性的肺成熟度较低，气道相对较窄，O_3 引起的刺激可能会在男性中出现潜在的严重阻塞，同时男性更有可能从事户外工作，因此可能长时间暴露于高浓度的空气污染物中；此外，男性的抗氧化水平可能较女性更低，中和外源性毒物的能力较弱，这使他们更易受空气污染物的影响[18–19]。但也有研究表明，女性较男性对 O_3 更加敏感[20]。这种研究间的差异可能与不同国家城市环境、气候、人群受教育程度、种族差异和监测方式均有关，因此未来的研究需在更大尺度上进一步探索大气 O_3 相关健康影响中性别差异的来源。本研究中，>65 岁老年人群短期 O_3 暴露对 EAD 的影响较大，O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可升高 10%（*OR*=1.10，95%*CI*=1.05～1.15）。目前有关老年人群 EAD 的研究主要基于发病率和死亡率的数据，这限制了本研究与其他研究结果的比较。例如，在中国一项 2013—2018 年全国性数据分析中，大气 O_3 每升高 10 μg/m^3，>75 岁人群中非意外和循环系统疾病的死亡风险可分别增加 0.13%（95%*CI*=0.07%～0.18%）和 0.11%（95%*CI*=0.03%～0.18%）[21]；一项涵盖中国多个地区的 meta 分析结果显示，老年人群在大气 O_3 污染环境的死亡风险更高，提示老年人群对大气 O_3 更为敏感[22]。这可能是因为老年人的免疫系统较弱，患慢性心肺疾病的频率较高，因此更易受大气 O_3 污染的影响[23]。

本研究结果还显示，无论是冷季还是暖季，短期 O_3 暴露与 EAD 累积风险均呈正相关，冷季和暖季 O_3 日最大 8 h 平均浓度每增加 1 个 *IQR*，EAD 累积风险可分别升高 4%（*OR*=1.04，95%*CI*=1.01～1.07）和 7%（*OR*=1.07，95%*CI*=1.04～1.11）。暖季的点估计值略高于冷季，与德州市暖季大气 O_3 浓度高于冷季的结果一致。在一项中国气态污染物和急诊救护车呼叫的多城市时间序列研究中，暖季大气 O_3 每增加 10 μg/m^3，急诊救护车呼叫的全因超额相对风险（Excess Relative Risk，*ERR*）为 0.01%（95%*CI*=0.05%～0.08%），高于冷季 *ERR* 值的 −0.24%（95%*CI*= −0.80%～0.32%）[24]，这与本研究结果相似，提示暖季时人群对 O_3 暴露的危害可能更加敏感，应当加强暖季时大气 O_3 浓度的监测，必要时可减少户外活动。

综上所述，德州市短期 O_3 暴露与 EAD 呈正相关，其中对男性、>65 岁人群以及暖季 EAD 的影响较大。本研究关注 EAD 这一急性健康反应指标，与既往研究相比具有一定的创新性，且具有空气污染物数据的时间分层、病例交叉研究设计能够通过有效调整时间不变的混杂因素来做出关联推断，这有助于为 O_3 高浓度污染天气院前急救服务的提前部署和公共卫生干预措施的合理制定提供科学依据，有利于充分优化医疗资源的分配。但本研究仍存在一定的局限性，如尽管本研究的暴露因素赋值采用栅格中心点的数值，但与个体呼救时所处位置的实际暴露可能存在一定误差，且无法获得个体活动轨迹，因此仍不能完全代表个人暴露，但随着未来对个体暴露测量技术的发展，这一问题或可解决。

数据可用性声明 本研究中气象数据来源于中国气象数据网（https://data.cma.cn/）、污染物 CHAP 数据集来源于国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpdc.ac.cn)，相关数据若因平台更新、调整、关闭，数据无法获取，作者不再单独提供相应数据，敬请理解；急诊救护车调度数据因涉及参与者隐私保护和伦理限制原因无法公开共享，但经脱敏处理后的数据可在合理请求下向通信作者申请获取。申请需通过伦理委员会审批，并签署数据使用协议。

参考文献

[1] 夏永杰, 周璐, 牛越, 等. 2020 年中国大气臭氧对慢性阻塞性肺病死亡影响的疾病负担分析和健康经济学评价 [J]. 环境科学研究, 2023, 36(2): 237-245.

[2] 葛南, 潘璐, 张欣, 等. 大气污染物暴露与青岛市居民脑卒中发病关系时间序列分析 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(10): 1161-1168.

[3] Phung V L H, Ueda K, Kasaoka S, et al. Acute effects of ambient $PM_{2.5}$

on all-cause and cause-specific emergency ambulance dispatches in Japan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(2): 307.

[4] Liu L J, Song F J, Fang J Y, et al. Intraday effects of ambient PM_1 on emergency department visits in Guangzhou, China: a case-crossover study[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: 142347.

[5] Jiang J, Wu D G, Chen Y J, et al. Relationship between different air pollutants and total and cause-specific emergency ambulance dispatches in Shanghai, China[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2021, 94(7): 1709-1719.

[6] 中华人民共和国生态环境部. 2022 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. (2023-05-24)[2024-11-15].https://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/202305/W020230531511478063909.pdf.

[7] 韦晶, 李占清. 中国高分辨率高质量地面 O_3 数据集 (2000—2023)[EB/OL]. (2024-08-19)[2024-11-15]. https://www.selectdataset.com/dataset/484f4a57f9987ce2e9e53ed9ea72b9a3.

[8] 韦晶, 李占清. 中国高分辨率高质量地面 SO_2 数据集 (2013—2020)[EB/OL]. (2024-08-19)[2024-11-15]. https://www.aers-cloud.org.cn/%e8%9e%8d%e5%90%88%e4%ba%a7%e5%93%81/chinahighso2.

[9] 韦晶, 李占清. 中国高分辨率高质量地面 NO_2 数据集 (2008—2023)[EB/OL]. (2024-08-19)[2024-11-15]. https://www.selectdataset.com/dataset/becb2c12ab0832db56ab48e52e6f26a0.

[10] Wu Y, Li S S, Guo Y M. Space-time-stratified case-crossover design in environmental epidemiology study[J]. Health Data Science, 2021, 2021: 9870798.

[11] 明小燕, 韩阳, 杨忠诚, 等. 极端高温天气与宜昌市居民非意外死亡关系时间分层病例交叉分析 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(10): 1169-1175.

[12] Ho A F W, Hu Z X, Woo T Z C, et al. Ambient air quality and emergency hospital admissions in Singapore: a time-series analysis[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(20): 13336.

[13] 张娅, 尹胜利, 杨卫红, 等. 极端高温急性健康效应的季节内差异: 以山东省德州市急诊呼救数据为例 [J]. 环境与职业医学, 2024, 41(8): 849-854.

[14] Phosri A, Ueda K, Seposo X, et al. Effect modification by temperature on the association between O_3 and emergency ambulance dispatches in Japan: a multi-city study[J]. Science of the Total Environment, 2023, 861: 160725.

[15] Lv X, Shi W Y, Yuan K, et al. Hourly air pollution exposure and emergency hospital admissions for stroke: a multicenter case-crossover study[J]. Stroke, 2023, 54(12): 3038-3045.

[16] Chen J Y, Jiang X Y, Shi C L, et al. Association between gaseous pollutants and emergency ambulance dispatches for asthma in Chengdu, China: a time-stratified case-crossover study[J]. Environmental Health and Preventive Medicine, 2019, 24(1): 20.

[17] Wang Y C, Sung F C, Chen Y J, et al. Effects of extreme temperatures, fine particles and ozone on hourly ambulance dispatches[J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142706.

[18] Chen Y Y, Chen S L, Zhang L, et al. Association between ambient air pollutants and short-term mortality risks during 2015–2019 in Guangzhou, China[J]. Frontiers in Public Health, 2024, 12: 1359567.

[19] Wang S S, Li Y F, Niu A M, et al. The impact of outdoor air pollutants on outpatient visits for respiratory diseases during 2012–2016 in Jinan, China[J]. Respiratory Research, 2018, 19(1): 246.

[20] Kumar V, S H, Huligowda L K D, et al. Environmental pollutants as emerging concerns for cardiac diseases: a review on their impacts on cardiac health[J]. Biomedicines, 2025, 13(1): 241.

[21] Chen C, Li T T, Sun Q H, et al. Short-term exposure to ozone and cause-specific mortality risks and thresholds in China: evidence from nationally representative data, 2013–2018[J]. Environment International, 2023, 171: 107666.

[22] 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 等. 不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 [J]. 环境科学, 2022, 43(1): 37-45.

[23] 李莉, 周筱丛, 吕烨, 等. 空气污染物对杭州市非意外死亡人群预期寿命影响研究 [J]. 环境与健康杂志, 2024, 41(12): 1043-1049.

[24] Chen L, Wang X J, Qian Z M, et al. Ambient gaseous pollutants and emergency ambulance calls for all-cause and cause-specific diseases in China: a multicity time-series study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(19): 28527-28537.