调查研究
Investigation

昆明市 2017—2019 年大气臭氧污染对人群非意外死亡影响的时间序列研究

陈皓，李旭，苏晓梅，韩瑞萍，董丽琼

昆明市疾病预防控制中心环境卫生科，云南 昆明 650228

DOI 10.11836/JEOM21597

摘要：

[背景] 昆明市属于高原城市，日照充足，紫外线强度大，辐射强，近年来臭氧（O_3）污染逐渐成为大气污染的首要问题。

[目的] 探讨昆明市大气 O_3 暴露对人群非意外死亡的健康影响。

[方法] 收集 2017—2019 年昆明市气象（平均温度、平均相对湿度、平均气压、平均风速）、大气污染物（$PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、CO、O_3）、人群非意外死亡的资料，采用广义相加模型进行时间序列分析 O_3 浓度对居民每日非意外死亡人数的当日（lag0）、单日（lag1~lag3）及平均滞后效应（lag01~lag03），并对性别、年龄进行分层分析，分暖、冷季进行季节分析。

[结果] 2017—2019 年 O_3-8 h 平均浓度为（84.3±32.3）μg·m^{-3}。O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}：lag0 时全人群非意外死亡风险增加 0.70%（95%*CI*：0.11%~1.29%），lag01 和 lag02 时增加 0.79%（95%*CI*：0.14%~1.44%）、0.75%（95%*CI*：0.08%~1.43%）；女性非意外死亡风险 lag2 和 lag02 时增加 0.80%（95%*CI*：0.08%~1.53%）、1.05%（95%*CI*：0.09%~2.03%）；>65 岁人群 lag0、lag01、lag02 时非意外死亡风险增加 0.82%（95%*CI*：0.16%~1.48%）、0.93%（95%*CI*：0.20%~1.67%）、0.96%（95%*CI*：0.20%~1.73%）；暖季居民非意外死亡风险 lag0 时增加 0.91%（95%*CI*：0.12%~1.70%），lag01 和 lag02 时增加 0.98%（95%*CI*：0.12%~1.86%）、1.00%（95%*CI*：0.07%~1.93%）。在引入 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、CO 后，O_3 暴露水平对居民非意外死亡影响的变化无统计学意义。

[结论] O_3 暴露水平的提高会增加昆明市居民非意外死亡的风险，且存在滞后效应，>65 岁人群和女性可能为敏感人群，暖季时人群对 O_3 暴露可能更敏感。

关键词：臭氧；昆明；暴露；时间序列；非意外死亡

Time-series analysis on health effects of atmospheric ozone exposure on non-accidental deaths in Kunming during 2017—2019

CHEN Hao, LI Xu, SU Xiaomei, HAN Ruiping, DONG Liqiong (Environmental Hygiene Division, Kunming Center for Disease Control and Prevention, Kunming, Yunnan 650228, China)

Abstract:

[Background] Kunming is a plateau city with sufficient sunshine, high ultraviolet intensity, and strong radiation. In recent years, ozone (O_3) pollution has gradually become the primary problem of air pollution in the city.

[Objective] To evaluate the health effects of atmospheric O_3 exposure on non-accidental deaths in Kunming.

[Methods] The data of meteorological variables (average temperature, average relative humidity, average air pressure, and average wind speed), air pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10}, SO_2, CO, and O_3) and non-accidental deaths (NAD) of residents were collected in Kunming from 2017 to 2019. A generalized additive model was adopted to conduct time-series analyses on the current-day (lag0), single-day (lag1-lag3), and cumulative lag (lag01-lag03) effects of O_3 on NAD; furthermore, hierarchical analyses by gender, age, and season (warm and cold) were conducted.

[Results] The average concentration of O_3-8h from 2017 to 2019 was (84.3±32.3) μg·m^{-3}. For every 10 μg·m^{-3} increase in O_3-8h concentration, the NAD risks of lag0, lag01, and lag02 of total population increased by 0.70% (95%*CI*: 0.11%-1.29%) 0.79% (95%*CI*: 0.14%-1.44%), and 0.75% (95%*CI*: 0.08%-1.43%), respectively; for women, the NAD risks of lag2 and lag02 increased by

基金项目
昆明市科技计划项目（昆科计字 2019-1-S-25318000001720 号）

作者简介
陈皓（1990—），男，学士，主管医师；
E-mail：chenhao900620@163.com

通信作者
苏晓梅，E-mail：sxmisshe@163.com

伦理审批 已获取
利益冲突 无申报
收稿日期 2021-12-19
录用日期 2022-04-12

文章编号 2095-9982(2022)08-0883-07
中图分类号 R122
文献标志码 A

▸引用
陈皓，李旭，苏晓梅，等. 昆明市 2017—2019 年大气臭氧污染对人群非意外死亡影响的时间序列研究 [J]. 环境与职业医学，2022，39（8）：883-889.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21597

Funding
This study was funded.

Correspondence to
SU Xiaomei, E-mail: sxmisshe@163.com

Ethics approval Obtained
Competing interests None declared
Received 2021-12-19
Accepted 2022-04-12

▸ To cite
CHEN Hao, LI Xu, SU Xiaomei, et al. Time-series analysis on health effects of atmospheric ozone exposure on non-accidental deaths in Kunming during 2017—2019[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(8): 883-889.

▸ Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21597

0.80% (95%*CI*: 0.08%-1.53%) and 1.05% (95%*CI*: 0.09%-2.03%) respectively; for the residents over the age of 65, the associated NAD risks of lag0, lag01, and lag02 increased by 0.82% (95%*CI*: 0.16%-1.48%), 0.93% (95%*CI*: 0.20%-1.67%), and 0.96% (95%*CI*: 0.20%-1.73%), respectively; in the warm season, the NAD risks of lag0, lag01, and lag02 increased by 0.91% (95%*CI*: 0.12%-1.70%), 0.98% (95%*CI*: 0.12%-1.86%), and 1.00% (95%*CI*: 0.07%-1.93%), respectively; After introducing $PM_{2.5}$, PM_{10}, SO_2, NO_2, and CO to the model, the effects of O_3 exposure level on resident's NAD was not statistically significant.

[Conclusion] An increase of O_3 exposure level associates with an increase of NAD risk in residents, and there is a lag effect. Residents over the age of 65, women, and all residents in warm season may be more sensitive to O_3 exposure.

Keywords: ozone; Kunming; exposure; time series; non-accidental death

近年来我国空气污染由传统的煤烟型向复合型（煤烟型和机动车尾气混合污染）转变，汽车尾气中的氮氧化物和挥发性有机物通过光化学反应生成臭氧（ozone,O_3），导致大气 O_3 污染逐渐加重。O_3 已经成为我国空气污染的主要问题之一。O_3 是氮氧化物和挥发性有机物等在大气中通过一系列光化学反应生成的二次污染物，对人体健康和生态环境均可产生较大影响[1]。

昆明市是云南省省会，是一座低纬度高原山地城市，日照充足，紫外辐射强。近年来随着环保力度的加大，大气质量逐步向好，优良天气越来越多，但随着城市发展建设，机动车保有量的增加，O_3 浓度逐年上升，O_3 逐渐成为昆明空气污染不可忽视的问题。

国外大量关于大气 O_3 暴露对于人群危害的生态学研究发现，O_3 浓度与人群非意外死亡、住院数、急诊数等多种健康结局存在相关性[2–4]。国内的流行病学研究也发现大气中 O_3 浓度的上升会导致我国人群非意外总死亡率、心血管系统疾病死亡率和呼吸系统疾病死亡率增加，且中国 O_3 短期暴露对死亡风险影响的暴露-反应关系系数较高[5–7]。国内目前已有研究多位于北方或沿海发达地区，针对云南省 O_3 暴露与人群健康的流行病学研究相对较少，且昆明市地理位置特殊，研究昆明市 O_3 暴露对人群非意外死亡的影响，对昆明市居民的健康防护有现实意义。因此，本研究使用时间序列方法评价昆明市大气 O_3 暴露对居民非意外死亡的影响。

1 材料与方法

1.1 资料来源

从中国疾病预防控制中心死因登记报告系统收集 2017—2019 年昆明市主城区常住人口死因资料，指标包括性别、死亡时间、出生日期、根本死因，对根本死因按照世界卫生组织制定的国际疾病分类第 10 版（International Classification of Diseases-10, ICD-10）进行分类，非意外死亡为 A00~R99，心血管系统疾病死亡为 I00~I99，呼吸系统疾病死亡为 J00~J99。从昆明市生态环境局和昆明市气象局收集同期污染物资料和气象资料，污染物指标包括 O_3（指标为 O_3-8 h）、可吸入颗粒物（inhalable particulates, PM_{10}）、细颗粒物（fine particulate matter, $PM_{2.5}$）、二氧化氮（nitrogen dioxide, NO_2）、二氧化硫（sulfur dioxide, SO_2）和一氧化碳（carbon monoxide, CO），气象指标包括日照小时数、日均温度、日均气压和相对湿度。本研究数据使用通过昆明市疾病预防控制中心生物医学研究伦理委员会审查（编号：02）。

1.2 统计学处理

采用广义相加模型分析昆明市常住居民非意外死亡人数与当日及滞后效应的 O_3 浓度的相关性[8]。广义相加模型公式为：$\lg[E(Y_t)]=\beta Z_t+ns(V_{time},v)+ns(V_{temp},v)+ns(V_{rhum},v)+V_{dow}+V_{intercept}$。式中：$E(Y_t)$ 为观察日 t 死亡人数的数据期望；β 为回归系数；Z_t 为第 t 日的 O_3 质量浓度（浓度），μg·m^{-3}；ns 为自然样条平滑函数；V_{time} 代表时间；V_{temp} 代表平均温度；V_{rhum} 代表平均相对湿度；v 代表自由度；V_{dow} 代表星期，以分类变量的形式纳入模型；$V_{intercept}$ 代表截距。日均温度、日均相对湿度、时间长期趋势和季节趋势采用自然样条平滑函数拟合。基于经验[8]日均温度、日均相对湿度自由度 v 选择为 3，基于赤池信息法则[9]确定时间趋势自由度 v 为 9·年$^{-1}$。分析 O_3-8 h 浓度对居民每日非意外死亡人数的当日（lag0）、单日（lag1~lag3）及平均滞后效应（lag01~lag03），计算 O_3-8 h 浓度每升高10 μg·m^{-3}，居民非意外死亡增加的超额危险度（excess risk, *ER*）及95%置信区间（confidence interval, *CI*）。

分析大气污染物 O_3 对居民非意外死亡的单日及平均滞后效应的影响，选择其中最显著的效应日，调整时间在自然样条函数中不同的自由度和实施双污染物模型（选择相关性 $r<0.6$ 的 PM_{10}、$PM_{2.5}$、SO_2、O_3、CO）分析，以判断模型的稳定性。

采用 SPSS 20.0 分析，气象、大气污染物和居民非意外死亡数据采用$\bar{x}\pm s$、最小值、最大值和百分位数

(P_{25}、M、P_{75})进行统计描述；采用 Spearman 相关分析大气污染物之间及与气象指标的相关性，检验水准 α=0.05。运用 R4.11 分析软件进行时间序列分析，计算 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3} 对各类指标的影响，同时分冷季(12—2 月)、暖季(5—8 月)对季节因素进行探讨。

2 结果

2.1 O_3 概况

2017—2019 年昆明市大气质量主要为优良，偶有轻度污染，无中重度污染。O_3 超标成为昆明轻度污染的主要原因，O_3 超过一级、二级标准的天数和 O_3-8 h 浓度的均值和 P_{90} 均呈现逐年增加的趋势。见表 1。

表 1 昆明市 2017—2019 年大气 O_3 概况

Table 1 Overview of ambient O_3 in Kunming from 2017 to 2019

时间	O_3导致轻度污染的天数/d	O_3超过一级标准的天数/d	O_3超过二级标准的天数/d	浓度/(μg·m^{-3})						
				$\bar{x}\pm s$	最小值	P_{25}	M	P_{75}	P_{90}	最大值
2017	1	99	1	79.9±31.4	12.5	56.3	76.0	102.8	123.9	170.8
2018	4	115	4	83.8±32.9	9.5	59.8	75.3	111.6	130.5	170.0
2019	8	119	8	89.2±32.1	12.8	68.0	83.1	111.3	134.6	183.7

2.2 描述性分析

大气污染物资料显示：2017—2019 年，昆明市 O_3-8 h 平均浓度为(84.3±32.3) μg·m^{-3}，达到国家一级标准；P_{75} 为 107.7 μg·m^{-3}，超过国家一级标准；最大值为 183.7 μg·m^{-3}，超过国家二级标准。死因监测资料显示，昆明市居民非意外死亡中，男性占比 59.2%，65 岁以上人口占比 76.9%。人群死亡数、大气污染物浓度和气象因素概况见表 2。

表 2 2017—2019 年昆明市人群死亡数、大气污染物浓度和气象因素概况

Table 2 Deaths, air pollutants, and meteorological factors in Kunming from 2017 to 2019

指标	$\bar{x}\pm s$	最小值	P_{25}	M	P_{75}	最大值
每日死亡人数/(例·d^{-1})						
非意外死亡总数	42.4±10.3	20	35	41	48	91
男性	25.1±6.8	10	20	24	29	55
女性	17.3±5.4	5	14	17	20	43
≤65	9.8±3.5	1	7	10	12	23
>65	32.6±8.6	15	27	31	37	70
心血管系统疾病	18.4±5.8	5	14	18	22	45
呼吸系统疾病	7.5±3.3	0	24	5	7	9
大气污染物浓度						
O_3-8 h/(μg·m^{-3})	84.3±32.3	9.5	61.8	79.0	107.7	183.7
NO_2/(μg·m^{-3})	32.3±8.6	13.5	25.5	31.5	37.5	74.0
CO/(mg·m^{-3})	0.8±0.2	0.3	0.7	0.8	1.0	1.8
$PM_{2.5}$/(μg·m^{-3})	27.5±12.8	7.2	18.2	24.5	34.7	101.2
PM_{10}(μg·m^{-3})	51.3±22.9	14.2	34.5	46.0	65.7	173.8
SO_2/(μg·m^{-3})	13.1±4.6	5.3	10.0	12.3	15.2	39.2
气象因素						
气压/hPa	810.9±3.2	803.0	808.6	810.7	813.1	822.4
温度/℃	16.1±4.8	0.1	12.3	16.5	20.1	25.4
相对湿度/%	70.2±13.6	32.0	60.8	72.8	80.8	97.0
日照小时数/(h·d^{-1})	6.4±3.8	0.0	3.0	7.5	9.8	12.9

对 2017—2019 年昆明市大气 O_3-8 h 每日浓度和居民每日非意外死亡数绘图，得到 O_3-8 h 和每日死亡人数的时间序列图(图 1)。由图可见，每年春季(3—5 月)为大气 O_3-8 h 浓度的高峰季节，每年冬季(12—2 月)为每日非意外死亡人数的高峰季节。

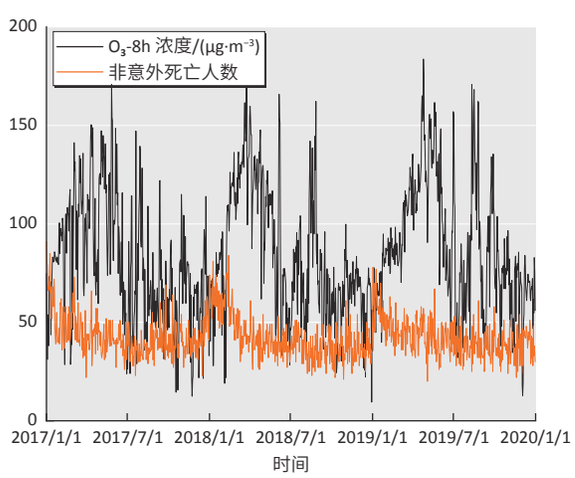


图 1 昆明市大气 O_3-8 h 浓度及人群非意外死亡的时间序列图

Figure 1 Time series of O_3-8 h atmospheric mass concentration and non-accidental deaths in Kunming

2.3 相关性分析

Spearman 相关分析显示(表 3)，O_3-8 h 除了与 CO 相关没有统计学意义，与其他大气污染物均存在一定程度的正相关，其中与 PM_{10}(r=0.448)和 $PM_{2.5}$ 相关性较强(r=0.397)。O_3-8 h 与温度、日照小时数呈正相关，与气压、相对湿度呈负相关，其中与日照小时数(r=0.553)和相对湿度(r=-0.655)相关性最强。

2.4 时间序列分析

全人群单日滞后效应在 lag0 最大，其后呈现逐渐下降的趋势，lag0 时 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，居

民非意外死亡风险增加 0.70%(95%*CI*: 0.11%~1.29%)。平均滞后效应强于单日滞后,在 lag01 最大,其后也呈现逐渐下降的趋势,lag01 和 lag02 时 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3},死亡风险增加 0.79%(95%*CI*: 0.14%~1.44%)、0.75%(95%*CI*: 0.08%~1.43%)。

表 3 2017—2019 年昆明市 O_3-8 h 与其他大气污染物、气象指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of O_3-8 h with other air pollutants and meteorological indicators in Kunming from 2017 to 2019

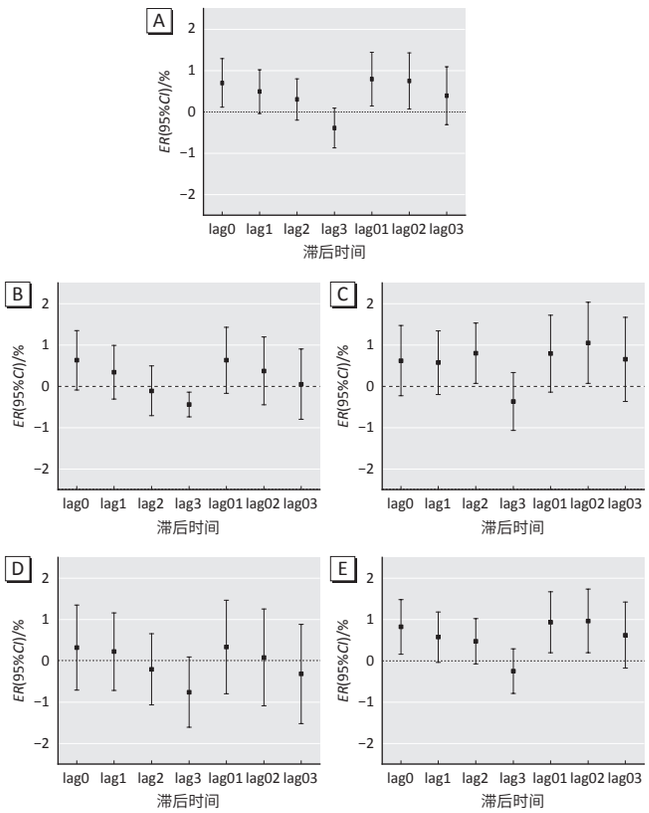
O_3-8 h	大气污染物					气象因素			
	NO_2	CO	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	气压	温度	相对湿度	日照小时数
*r*值	0.158	0.019	0.397	0.448	0.248	−0.214	0.291	−0.655	0.553
*P*值	**<0.01**	0.54	**<0.01**	**<0.01**	**<0.01**	**<0.01**	**<0.01**	**<0.01**	**<0.01**

人群分层分析显示:女性平均滞后效应强于单日滞后,单日滞后效应和平均滞后效应均呈现先上升后下降的趋势,在 lag2 和 lag02 处达到高峰,lag2 和 lag02 时,O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3},非意外死亡风险增加 0.80%(95%*CI*: 0.08%~1.53%)、1.05%(95%*CI*: 0.09%~2.03%);>65 岁人群平均滞后效应强于单日滞后,单日滞后效应在 lag0 处最大,其后逐渐下降,平均滞后效应先上升后下降,在 lag02 达到高峰,lag0 和 lag01、lag02 时,O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3},非意外死亡风险增加 0.82%(95%*CI*: 0.16%~1.48%)、0.93%(95%*CI*: 0.20%~1.67%)、0.96%(95%*CI*: 0.20%~1.73%);在男性人群与≤65 岁人群中效应均无统计学意义。见图 2。

分冷季(12—2 月)、暖季(5—8 月)对不同季节进行探讨发现(图 3),暖季平均滞后效应总体上大于单日滞后效应,单日滞后效应在 lag0 最大,其后逐渐下降,lag0 时 *ER* 值为 0.91%(95%*CI*: 0.12%~1.70%),平均滞后效应先上升后下降,在 lag02 达到最大,lag01 和 lag02 时 *ER* 值分别为 0.98%(95%*CI*: 0.12%~1.86%)、1.00%(95%*CI*: 0.07%~1.93%),冷季效应无统计学意义。对死亡原因按照心血管疾病死亡和呼吸系统疾病死亡进行分析,效应未发现统计学意义。见图 4。

2.5 敏感性分析

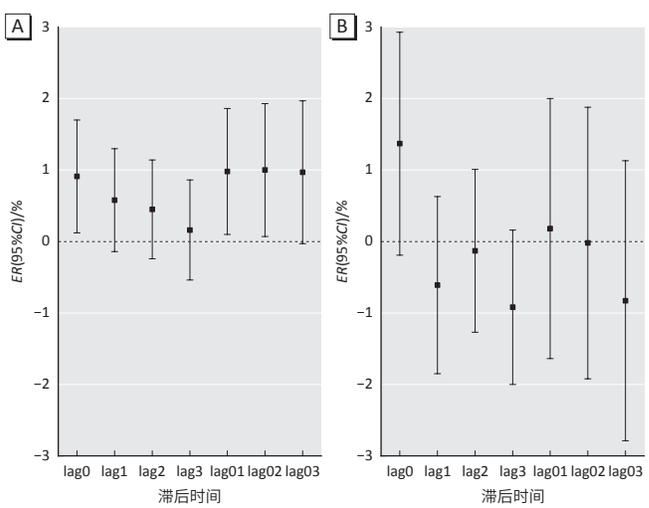
选择效应最强的 lag01,调整时间在自然样条函数中不同的自由度,观察对 *ER*(95%*CI*)的影响,判断模型的稳定性,结果显示在 7~11 的自由度之间,人群非意外死亡风险的 *ER*(95%*CI*)没有明显变化,见图 5。选择效应最强的 lag01 引入其他污染物,观察对 *ER*(95%*CI*)的影响,发现单独引入 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、CO 和引入 $PM_{2.5}$+PM_{10}+SO_2+NO_2+CO 后,O_3-8 h 浓度对人群非意外死亡的影响变化均没有统计学意义,见图 6。



[注] A: 全人群; B: 男性; C: 女性; D: ≤65 岁; E: >65 岁。

图 2 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3} 对昆明市人群非意外死亡的影响

Figure 2 Effects of per 10 μg·m^{-3} increase of O_3-8 h concentration on non-accidental deaths in Kunming



[注] A: 暖季; B: 冷季。

图 3 不同季节 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3} 对昆明市人群非意外死亡的影响

Figure 3 Effects of per 10 μg·m^{-3} increase of O_3-8 h concentration in different seasons on non-accidental deaths in Kunming

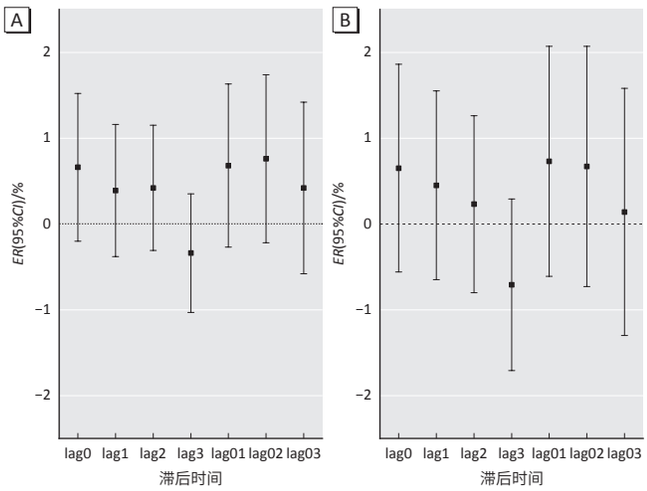


图 4 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3} 对昆明市人群心血管系统疾病(A)、呼吸系统疾病(B)死亡的影响

Figure 4 Effects of per 10 μg·m^{-3} increase of O_3-8 h concentration on deaths of cardiovascular diseases (A) and respiratory diseases (B) in Kunming

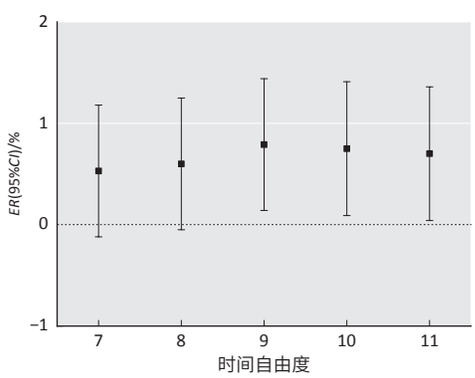


图 5 不同时间自由度对模型稳定性的影响

Figure 5 Influence of different time degrees of freedom on model stability

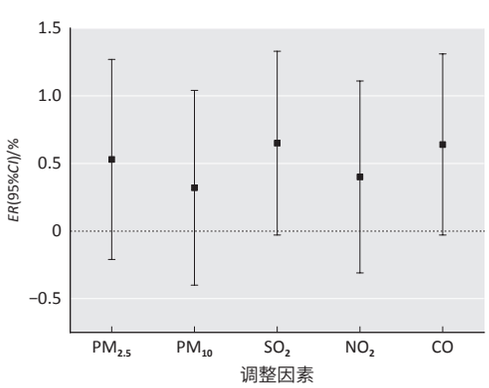


图 6 不同污染物模型下(lag01) *ER* 及 95%*CI*

Figure 6 *ER* and 95%*CI* under different pollutant models (lag01)

3 讨论

本研究对 2017—2019 年昆明市大气污染物浓度进行研究，发现虽然目前昆明市 O_3 浓度仍处于一个较低水平，但是近年来 O_3 浓度逐年增高，偶有超过二级标准的情况发生，且昆明市颗粒物等大气污染物浓度逐年下降，已经很少导致轻度污染，O_3 已经成为导致昆明市出现轻度污染的首要污染物，表明研究昆明市 O_3 对人群健康的影响具有重要意义。

时间序列图显示每年 3—5 月为大气 O_3-8 h 浓度的高峰季节，呈现单峰值，这与京津冀 O_3 高值出现在夏季，峰值出现在 6 月不同，这可能与昆明春季日照充足，白天地表温度较高，容易在入夜时产生逆温有关[10]。O_3 与气象因素的相关研究显示 O_3-8 h 浓度与温度、日照小时数呈正相关，与气压、相对湿度呈负相关。京津冀夏季温度较高，日照充足，而昆明夏季(6—8 月)为湿季，多云多雨，日照较少，表明这种高峰值的差异可能是由气候差异引起。同时 O_3 与气象因素的相关研究结果提示 O_3 浓度在无云少云高日照、高温、无降水的天气较高，当此类气象出现时，应注意加强预警，提醒居民加强防护。O_3-8 h 与 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 相关性较强，可能与两者都来源于机动车尾气和在逆温等不利于大气污染物扩散的天气时浓度均较高有关，该研究结果提示在 O_3 浓度较高时，颗粒物浓度也可能较高，需同时加强两者的防护。

广义相加模型分析结果显示，单日滞后情况下，O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，当天居民非意外死亡的死亡风险增加 0.70%(95%*CI*：0.11%~1.29%)；平均滞后情况下，O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，lag01 和 lag02 时死亡风险增加 0.79%(95%*CI*：0.14%~1.44%)、0.75%(95%*CI*：0.08%~1.43%)，说明昆明市 O_3 浓度升高会增加人群非意外死亡的风险，且存在滞后效应，平均滞后效应大于单日滞后效应。滞后效应主要集中在 1~2 d。效应与珠三角地区的 0.81%(95%*CI*：0.63%~1.00%)接近，高于上海的 0.31%(95%*CI*：0.13%~0.48)，这可能与污染物浓度、气候、人群构成不同有关[5]。

对死亡居民的性别和年龄进行分层分析，发现 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，在 lag2 和 lag02，女性非意外死亡风险增加，而男性人群结果无统计学意义，提示女性可能对 O_3 更加敏感。陈琦[11]、Zhao 等[12]的研究也发现同样规律，可能是由性别间职业、文化水平差异导致暴露机会不同引起。周权等[13]研究发现男性相对女性更加敏感，这种研究差异可能由昆明、福州两地人群构成、地理环境、大气污染等潜在健康影响因素不同造成。本研究发现 > 65 岁人群 lag0、lag01、lag02 时非意外死亡风险增加，65 岁及以下人群死亡风险增加未发现统计学意义，提示 65 岁以上人群可能为 O_3 影响的易感人群。这一发现与既往研究一致[11–13]，

可能与老年人免疫力低下、循环系统功能下降有关[14]。对季节分暖季和冷季进行分析，本研究发现暖季 O_3-8 h 浓度每升高 10 μg·m^{-3}，lag0、lag01 和 lag02 时居民非意外死亡的死亡风险均增加，冷季效应无统计学意义，表明暖季时人群对 O_3 暴露的危害更加敏感。这与芦静等[15]发现一致，这可能与暖季时昆明 O_3 浓度比冷季要高有关，也可能与暖季时人们户外活动较大，暴露概率较高有关。

本研究同时研究了 O_3 暴露对心血管疾病和呼吸系统疾病死亡的影响，结果并未发现死亡风险与 O_3 暴露的相关性。叶伟鹏[6]、陈琦[11]、芦静[15]等研究发现 O_3 短期暴露会导致心血管系统疾病死亡风险增加，本研究的不同发现可能与死亡指标敏感度低于发病指标以及昆明市心血管系统疾病死亡人数较少有关。陈浪[1]研究发现 O_3 短期暴露与呼吸系统疾病死亡具有关联，叶伟鹏[6]的研究则并未发现该规律。O_3 具有强氧化性，且人体吸入 80%~90%被呼吸道吸收，对呼吸系统有强烈刺激和损伤[1]。本次流行病学研究未能发现 O_3 短期暴露与呼吸系统疾病死亡风险的相关性，可能与 O_3 对人体呼吸道损伤引起发病较多、死亡可能较少及昆明市呼吸系统疾病死亡人数较少有关。

本研究敏感性分析显示在 7~11 的自由度之间，O_3-8 h 浓度与人群非意外死亡的 *ER*（95%*CI*）没有明显变化，表明模型稳定。单独引入 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、CO，O_3-8 h 浓度对人群非意外死亡的影响变化均没有统计学意义。引入其他污染物导致效应下降可能与污染物的相互作用有关，也可能与共线性有关。芦静等[15]发现仅纳入 PM_{10} 后包头人群死亡风险降低，纳入 $PM_{2.5}$、NO_2、SO_2、CO 后死亡风险均升高。贾云飞等[16]发现当纳入 $PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2、CO 时，大气 O_3 对南京人群循环系统疾病死亡风险的影响均有一定程度的降低；当纳入污染物 SO_2 时，死亡风险有一定程度的增加。引入其他污染物会影响 O_3 对人群健康效应，表明 O_3 对人群健康的危害可能不是独立效应，效应大小受到其他大气污染物的影响。昆明市其他污染物对 O_3 对人群健康效应的影响与包头、南京不同，可能与各地污染物浓度、构成比例、颗粒物成分、气候、人群构成不同有关。

本研究存在一定局限性。首先，本研究以环境监测站的 O_3 监测浓度代表人群平均暴露水平，但是多数人的主要活动时间在室内，呼吸高度主要为呼吸带高度，而环境监测站点 O_3 浓度与人群呼吸带 O_3 浓度，室内室外 O_3 浓度可能存在差异，因此人群真实 O_3 暴露水平与环境监测站点 O_3 浓度可能存在差异。其次，本研究仅分析了居民死亡的风险，未研究住院率、发病率等更敏感指标，未能发现 O_3 对不同系统疾病的健康影响。最后，本次研究是基于人群水平的数据而非个体水平的数据，属于生态学研究，无法避免生态学谬误存在的可能性。

综上，本研究显示昆明市 O_3 短期暴露会导致人群非意外死亡风险增加且存在滞后效应，女性和 65 岁以上人群为敏感人群，暖季时（5—8 月）O_3 污染对人群非意外死亡风险增加较为显著。昆明市 O_3 污染已对人群健康造成威胁，需加强对 O_3 污染的监测和治理，对敏感人群开展针对性的健康教育。

参考文献

[1] 陈浪, 赵川, 关茗洋, 等. 我国大气臭氧污染现状及人群健康影响[J]. 环境与职业医学, 2017, 34(11): 1025-1030.
CHEN L, ZHAO C, GUAN M Y, et al. Ozone pollution in China and its adverse health effects[J]. J Environ Occup Med, 2017, 34(11): 1025-1030.

[2] KATSOUYANNI K, TOULOUMI G, SAMOLI E, et al. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project[J]. Epidemiology, 2001, 12(5): 521-531.

[3] GRYPARIS A, FORSBERG B, KATSOUYANNI K, et al. Acute effects of ozone on mortality from the "air pollution and health: a European approach" project[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2004, 170(10): 1080-1087.

[4] HUANG Y, DOMINICI F, BELL M L. Bayesian hierarchical distributed lag models for summer ozone exposure and cardio-respiratory mortality[J]. Environmetrics, 2005, 16(5): 547-562.

[5] 闫美霖, 李湉湉, 刘晓途, 等. 我国臭氧短期暴露的人群健康效应研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(8): 752-761.
YAN M L, LI T T, LIU X T, et al. Human health effects of short-term ozone exposure: a review of Chinese epidemiological evidence[J]. J Environ Health, 2012, 29(8): 752-761.

[6] 叶伟鹏, 刘苗苗, 毕军. 中国臭氧短期暴露与人群死亡之间关系的Meta分析研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(7): 2644-2651.
YE W P, LIU M M, BI J. Meta-analysis of the associations between short-term ozone exposure and human mortality in China[J]. Acta Sci Circumst, 2020, 40(7): 2644-2651.

[7] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 我国臭氧短期暴露与人群死亡风险的Meta分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1477-1485.
DONG J Y, LIU X R, ZHANG B Z, et al. Meta-analysis of association between short-term ozone exposure and population mortality in China[J]. Acta Sci Circumst, 2016, 36(4): 1477-1485.

[8] 樊琳, 顾清, 曾强. 广义相加模型在大气污染流行病学研究中的应用进展[J]. 环境与职业医学, 2019, 36(7): 676-681.
FAN L, GU Q, ZENG Q. Progress in the application of generalized additive model in epidemiologic studies on air pollution[J]. J Environ Occup Med, 2019, 36(7): 676-681.

[9] HURVICH C M, SIMONOFF J S, TSAI C L. Smoothing parameter selection in nonparametric regression using an improved akaike information criterion [J]. J Roy Statist Soc Ser B Statist Methodol, 1998, 60(2): 271-293.

[10] 邓鑫, 于站良, 赵桂英, 等. 2015—2019年云南省城市空气质量特征及影响因素研究[J]. 四川环境, 2021, 40(4): 89-95.
DENG X, YU Z L, ZHAO G Y, et al. Characteristics and influencing factors of urban air quality from 2015 to 2019 in Yunnan[J]. Sichuan Environ, 2021, 40(4): 89-95.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 周权, 孙婷婷, 康淑玲, 等. 福州市臭氧暴露对人群非意外死亡的健康效应评价[J]. 中国预防医学杂志, 2021, 22(3): 218-222.
ZHOU Q, SUN T T, KANG S L, et al. Health effects of ozone exposure on non-accidental deaths in Fuzhou[J]. China Prev Med, 2021, 22(3): 218-222.

[14] 林在生, 林少凯, 王恺, 等. 低浓度$PM_{2.5}$对老年人群死亡的影响: 基于2015—2018年福州市数据的时间序列研究[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(2): 157-161.
LIN Z S, LIN S K, WANG K, et al. Time-series study on effects of low-concentration $PM_{2.5}$ on mortality in elderly people in Fuzhou from 2015 to 2018[J]. J Environ Occup Med, 2020, 37(2): 157-161.

[15] 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.

[16] 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.

(**英文编辑**: 汪源; **责任编辑**: 王晓宇)

(上接第 882 页)

[4] 赵宜静, 郑嵘, 杨敏娟, 等. 2015—2018年上海市浦东新区非职业性一氧化碳中毒流行病学分析[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(2): 152-154.
ZHAO Y J, ZHENG R, YANG M J, et al. Epidemiological characteristics of non-occupational carbon monoxide poisoning in Pudong New Area, Shanghai, 2015–2018[J]. J Environ Health, 2020, 37(2): 152-154.

[5] RUTH-SAHD L A, ZULKOSKY K, FETTER M E. Carbon monoxide poisoning: case studies and review[J]. Dimens Crit Care Nurs, 2011, 30(6): 303-14.

[6] 康伟, 张虎, 柴艳芬. 2016—2019年天津市蓟州区非职业性ACOP患者流行病学分析[J]. 天津医科大学学报, 2021, 27(2): 176-179.
KANG W, ZHANG H, CHAI Y F. Epidemiological analysis of non-occupational carbon monoxide poisoning patients in Jizhou District, Tianjin City from 2016 to 2019[J]. J Tianjin Med Univ, 2021, 27(2): 176-179.

[7] PROCKOP L D, CHICHKOVA R I. Carbon monoxide intoxication: an updated review[J]. J Neurol Sci, 2007, 262(1/2): 122-130.

[8] HOSSEININEJAD S M, AMINIAHIDASHTI H, KHATIR I G, et al. Carbon monoxide poisoning in Iran during 1999-2016: a systematic review and meta-analysis[J]. J Forensic Leg Med, 2018, 53: 87-96.

[9] 张永强, 马宁, 宁芳, 等. 2013-2017年北京市非职业性一氧化碳中毒事件的流行病学特征分析[J]. 现代预防医学, 2019, 46(16): 2921-2924.
ZHANG Y Q, MA N, NING F, et al. Epidemiological analysis of non-occupational carbon monoxide poisoning in Beijing between 2013 and 2017[J]. Mod Prev Med, 2019, 46(16): 2921-2924.

[10] 张亚英, 黄惠敏, 李志义. 384例急性一氧化碳中毒病例基本特征[J]. 环境与职业医学, 2015, 32(7): 670-672.
ZHANG Y Y, HUANG H M, LI Z Y. Epidemiological characteristics of 384 cases of acute carbon monoxide poisoning[J]. J Environ Occup Med, 2015, 32(7): 670-672.

[11] 叶珊珊, 胡灼君, 阮海林, 等. 2014—2017年柳州市区非职业性急性一氧化碳中毒患者流行病学特征分析[J]. 中华灾害救援医学, 2019, 7(7): 374-379.
YE S S, HU Z J, RUAN H L, et al. Analysis of epidemiological characteristics of non-occupational acute carbon monoxide poisoning patients in Liuzhou from 2014 to 2017[J]. Chin J Dis Med, 2019, 7(7): 374-379.

[12] 许明佳, 程薇. 2007—2015年上海市某郊区冬春季非职业性一氧化碳中毒事件流行病学特征[J]. 职业与健康, 2016, 32(14): 1936-1939.
XU M J, CHENG W. Epidemiological characteristics of non-occupational carbon monoxide poisoning during winter and spring of 2007–2015 in a suburb of Shanghai[J]. Occup Health, 2016, 32(14): 1936-1939.

[13] 阮海林, 胡灼君, 邓旺生, 等. 柳州市急性非职业性一氧化碳中毒与气象相关分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2020, 38(6): 611-615.
RUAN H L, HU Z J, DENG W S, et al. Association between occurrence of acute non-occupational carbon monoxide poisoning and meteorological factors in Liuzhou city[J]. Occup Health Emerg Rescue, 2020, 38(6): 611-615.

[14] 周贵珍, 崔志伟, 俞太念, 等. 2013—2015年上海市嘉定区非职业性一氧化碳中毒流行病学特征分析[J]. 健康教育与健康促进, 2018, 13(6): 546-548.
ZHOU G Z, CUI Z W, YU T N, et al. Epidemiological characteristics of non-occupational carbon monoxide poisoning in Jiading district, 2013 to 2015[J]. Health Educ Health Promot, 2018, 13(6): 546-548.

[15] 张文增, 王霄晔, 高永军, 等. 2006-2013年度北京市非职业性一氧化碳中毒事件报道[J]. 现代预防医学, 2016, 43(6): 997-1000,1004.
ZHANG W Z, WANG X Y, GAO Y J, et al. Report about non-occupational carbon monoxide poisoning from 2006 to 2013 in Beijing[J]. Mod Prev Med, 2016, 43(6): 997-1000,1004.

[16] MOTT J A, WOLFE M I, ALVERSON C J, et al. National vehicle emissions policies and practices and declining US carbon monoxide-related mortality[J]. JAMA, 2002, 288(8): 988-995.

(**英文编辑**: 汪源; **责任编辑**: 陈姣, 王晓宇)