

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

李秀¹, 方博²

1. 上海健康医学院护理与健康管理学院, 上海 201318

2. 上海市疾病预防控制中心信息所, 上海 200336

摘要:

[背景] 大气污染物和不适宜气温对健康的独立不良影响已得到证实, 但二者交互作用的研究结果并不一致。

[目的] 系统回顾大气污染物与气温交互作用对我国居民死亡影响的相关文献, 探析二者交互作用及其强度。

[方法] 检索万方数据知识服务平台、中国知网、维普资讯中文期刊服务平台、PubMed、Web of Science、Science Direct、Embase 数据库, 选用“气温”“大气污染物”“死亡”等主题检索词, 检索大气污染物与气温交互作用对我国居民死亡影响的相关文献。检索时限为 2000 年 1 月 1 日至 2022 年 7 月 31 日, 发表语言限制为中文和英文。由 2 名研究者根据纳排标准独立筛选文献, 提取资料后对文献结果进行整合研究, 使用 R 软件的“meta”程序包对文献研究结果进行 meta 分析。

[结果] 最终纳入符合标准的文献 27 篇, 涉及污染物主要包括 PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO₂、CO 等。与中等温度相比, 高温条件下 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 对人群死亡的交互作用更强, PM₁₀ 每上升 10 μg·m⁻³, 非意外总死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡危险度增加百分比及其 95%CI 分别为 2.30%(1.34%~3.26%)、1.23%(0.64%~1.82%)、1.42%(0.63%~2.22%); PM_{2.5} 每上升 10 μg·m⁻³, 非意外总死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡危险度增加百分比及其 95%CI 分别为 2.56%(2.00%~3.13%)、2.37%(1.64%~3.12%)、2.14%(1.03%~3.25%)。低温条件下 SO₂、NO₂ 对心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡的交互作用更强。

[结论] 大气污染物与气温对我国居民死亡存在交互作用, 高温或低温条件下大气污染物与气温对健康的交互作用强于中等温度, 在此条件下应进一步加强健康防护。

关键词: 大气污染物; 气温; 交互作用; 死亡率; 系统综述

Systematic review of synergistic effect between air pollutants and temperature on human mortality in China LI Xiu¹, FANG Bo² (1. School of Nursing and Health Management, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China; 2. Institute of Health Information, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

[Background] Air pollutants and extreme temperature both pose significant threats to human health, but the synergistic effect between air pollutants and temperature on health is inconsistent.

[Objective] To explore a potential synergistic effect between air pollutants and temperature on the mortality in China through literature review.

[Methods] Wanfang Data Knowledge Service Platform, China National Knowledge Infrastructure, VIP Information Chinese Journal Service Platform, PubMed, Web of Science, Science Direct, and Embase databases were searched. "Temperature" "air pollution" "mortality" were selected as keywords to collect literature on synergistic effect between air pollutants and temperature on mortality in China. Literature was published from 2000-01-01 to 2022-07-31 in Chinese or English. Two researchers screened the literature independently according to the inclusion criteria, and the results were integrated and analyzed after data extraction. The "meta" package of R software was used for meta-analysis.



DOI 10.11836/JEOM21570

作者简介

李秀(1982—), 女, 博士, 讲师;
E-mail: showshow_lee@163.com

通信作者

方博, E-mail: fangbo@scdc.sh.cn

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-11-28

录用日期 2022-08-16

文章编号 2095-9982(2022)09-1031-08

中图分类号 R12

文献标志码 A

引用

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.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21570

Correspondence to

FANG Bo, E-mail: fangbo@scdc.sh.cn

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-11-28

Accepted 2022-08-16

To cite

LI Xiu, FANG Bo. Systematic review of synergistic effect between air pollutants and temperature on human mortality in China[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(9): 1031-1037, 1044.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21570

[Results] Twenty-seven studies met the inclusion criteria and associated air pollutants included PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂, and CO. The impact of PM₁₀ and PM_{2.5} on mortality in high temperature days was higher than that in moderate temperature days. In high temperature days, a 10 µg·m⁻³ increment in PM₁₀ concentration corresponded to pooled estimates of 2.30% (95%CI: 1.34%-3.26%), 1.23% (95%CI: 0.64%-1.82%), and 1.42% (95%CI: 0.63%-2.22%) increase in non-accidental, cardiovascular, and respiratory mortalities, respectively. A 10 µg·m⁻³ increment in PM_{2.5} concentration corresponded to pooled estimates of 2.56% (95%CI: 2.00%-3.13%), 2.37% (95%CI: 1.64%-3.12%), and 2.14% (95%CI: 1.03%-3.25%) increase in non-accidental, cardiovascular, and respiratory mortalities, respectively. The synergistic effect of SO₂ and NO₂ on cardiovascular and respiratory mortalities in low temperature days was higher than that in moderate temperature days.

[Conclusion] The synergistic effects of air pollutants and temperature on mortality in low temperature days or in high temperature days are higher than that in moderate temperature days. The health protection related to these pollutants should be strengthened in these days.

Keywords: air pollutant; temperature; synergistic effect; mortality; systematic review

2019 年世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 将气候变化和大气污染列为威胁人类健康的十大问题之首^[1]。大气污染与人群死亡率密切相关,是造成全球疾病负担的主要因素^[2]。研究最为广泛的大气污染物包括:颗粒物(particulate matter, PM)、臭氧(ozone, O₃)、二氧化氮(nitrogen dioxide, NO₂)、二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)和一氧化碳(carbon monoxide, CO)。现有流行病学研究显示,大气污染物暴露可增加冠心病、心力衰竭、脑卒中、慢性阻塞性肺病等疾病的死亡风险,提高人群非意外总死亡率、心血管系统疾病死亡率、呼吸系统疾病死亡率^[3-5]。气温的变化可对人体的多个系统和器官造成不同程度损害,引起一系列急、慢性健康效应,例如极端气温暴露可导致心血管系统疾病、呼吸系统疾病、脑血管疾病、糖尿病和肾脏疾病等其他慢性疾病的发病与进展,增加人群死亡风险^[6-8]。

大气污染与气温在环境中并非孤立存在,人群可同时暴露于大气污染和不适宜的气温条件下,大气污染物浓度与气温变化之间又互相影响,因此大气污染物和气温对人体健康的影响综合而复杂。目前已有多项流行病学研究探讨了大气污染物与气温的交互作用对居民健康的影响,但研究结果存在差异^[9-10]。本研究系统回顾大气污染及气温对我国居民死亡影响的相关文献,旨在探析大气污染物与气温的交互作用及其强度,为我国大气污染防治和疾病防控工作提供科学依据。

1 对象与方法

1.1 文献检索策略

本研究检索中文数据库包括:万方数据知识服务平台、中国知网、维普资讯中文期刊服务平台。英文数据库包括:PubMed、Web of Science、Science Direct、Embase。中文检索分气象、污染、结局三个主题进行,

气象检索词包括:“气温”“高温”“低温”;污染检索词包括:“大气污染”“空气质量”“空气污染物”“颗粒物”“臭氧”“二氧化硫”“一氧化碳”“二氧化氮”;结局检索词为:“死亡”“死亡率”“健康影响”。以“OR”连接每个主题内的检索词进行检索,使用“AND”合并检索历史,获得检索结果后,进一步选用“交互”“协同”“修饰”等检索词用“OR”连接,在篇名、摘要和关键词中进行二次检索。英文检索词包括:“temperature”“heat”“cold”“air pollution”“particulate matter”“ozone”“sulphur dioxide”“carbon monoxide”“nitrogen dioxide”“death/mortality”“Heath effect”“interaction effect/interaction”“modulating effect/modification”“synergistic effect”“China”,检索策略与中文检索策略相同。检索时限为 2000 年 1 月 1 日至 2022 年 7 月 31 日。文献发表语言限制为中文和英文。

1.2 文献纳入与排除标准

纳入标准:(1)暴露条件同时包括大气污染物与室外气温;(2)温度指标为日平均气温;(3)健康结局包括非意外总死亡、呼吸系统疾病死亡或心血管系统疾病的死亡结局;(4)研究人群来自中国。排除标准:(1)室内、职业或意外污染物暴露;(2)气温指标为热浪、寒流、季节等非测量数据;(3)未讨论气温与大气污染交互作用;(4)病例报告、会议论文或综述类文献;(5)重复发表的文献。

1.3 信息提取

文献筛选和资料提取过程由 2 名研究者独立进行,在每个步骤结束后交叉核对,如有分歧则咨询第 3 名研究者协助判断。提取条目包括:作者与出版年份,研究地区与时间范围,研究设计,污染物,温度截点,健康结局,主要结论。

1.4 偏倚风险评价

采用 WHO 开发的观察性空气污染研究偏倚风险

评价工具(risk of bias assessment instrument, RoB)对纳入研究进行偏倚风险评估^[11]。RoB 工具包括混杂偏倚、选择性偏倚、暴露评估、结果测量、缺失数据、选择性报告等 6 个维度, 14 个子条目。根据 RoB 工具提供的指导和建议, 判断每项研究是否存在“低”“中”“高”等级的偏倚风险。当所有子条目的偏倚风险均判定为低风险时, 则该维度评估为低风险; 如果任何子条目被评为高风险, 则该维度判定为高风险; 当一个子条目被评为中风险, 且其他子条目没有被判定为高风险, 则该维度评为中风险。

1.5 数据分析

为量化大气污染物与温度交互作用对死亡率的影响, 将温度分为低、中、高三个层次, 分析不同温度层次下污染物对人群死亡的影响。由于各研究间具体的温度分层截点不同, 因此本研究未设定具体的温度截点, 直接沿用原论文的分层方法: 若原论文将温度区间分为 3 个层次, 则将低温层定义为“低”, 将高温层定义为“高”, 其他定义为“中”; 若原论文将温度区间分为 2 个层次, 则将低温层定义为“低”, 高温层定义为“高”。

数据分析使用 R 4.0.3 软件, meta 分析使用了“meta”程序包。筛选研究结果使用污染物每上升 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 死亡危险度增加百分比(OR)及其 95%置信区间(95%CI)表示的文献进行 meta 分析。采用 I^2 值估计异质性, 若 $I^2 \leq 50\%$, 采用固定效应模型, 否则选用随机效应模型。筛选采用相同的滞后天数(lag0-1)、温度分层(P_{25} , P_{75})的文献进行亚组分析, 评价敏感性。

2 结果

2.1 纳入文献的基本特征

按检索策略从中、英文数据库中共检索到文献 582 篇, 通过引文追溯补充文献 3 篇, 剔除重复文献、未涉及交互作用的文献以及内容不相关文献后, 最终纳入符合标准的文献 27 篇^[12-38], 文献检索及筛选流程详见图 1。

纳入文献覆盖全国 21 个省、自治区、直辖市、特别行政区的 23 个城市, 其中: 东部城市 12 个(52.17%), 中部和西部城市共 11 个(47.83%)。大气污染物主要分析 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 、CO 和黑炭(black carbon, BC)。健康结局指标以非意外总死亡、心脑血管系统疾病和呼吸系统疾病的死亡为主, 也有个别文献分析了缺血性心脏病、脑卒中等特定疾病死亡。温度分层方式包括: (1)日平均气温的百分位数分层($n=14$), 其中第 75 百分位数(P_{75})和第 25 百分位数(P_{25})

是最常用的分层温度($n=7$); (2)日平均气温的中位数、最适温度或可视转折点温度分层($n=10$); (3)日平均气温的最高值/最低值或每日温度变异度分层($n=3$)。详见表 1。

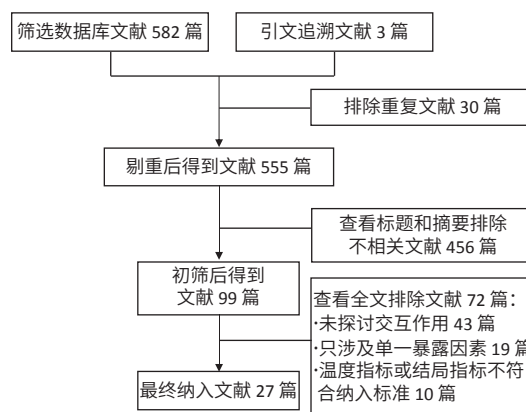


图 1 纳入文献的筛选流程图

Figure 1 Flow chart of studies included and excluded at each step of literature search

研究方法以广义相加模型(GAM)与分布滞后非线性模型(DLNM)相结合的方式为主, 拟合时间序列模型定量估计不同温度分层下, 大气污染物变化与各类疾病死亡率的关系。涉及的混杂因素主要包括人口学因素(年龄、性别等)、受教育程度、地域差异和相对湿度等其他气象因素。

2.2 颗粒物与气温的交互作用

19 篇(70.4%)纳入文献报告了颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、BC)与气温存在交互作用。其中 10 篇(37.0%)文献讨论了 PM_{10} 与气温的交互作用, 9 篇(33.3%)讨论了 $\text{PM}_{2.5}$ 与气温的交互作用。BC 作为 $\text{PM}_{2.5}$ 的一种重要组分, 近年来受到越来越多的关注, 有 3 篇文献分析了 BC 与气温交互作用, 均发表于 2020 年以后。

19 篇文献研究结果均证实颗粒物与气温对死亡的影响存在交互作用, 但交互作用模式在各研究间存在差异。10 篇文献认为高温与颗粒物存在交互作用, 高温条件下颗粒物浓度增加提升了非意外总死亡、心血管和呼吸系统疾病的死亡风险^[12, 14, 16, 20, 26, 28, 32-34, 36]; 有 4 篇文献认为仅在低温和极低温时能观察到交互作用^[15, 19, 23, 35]; 另 4 篇文献认为高温和低温均可以进一步增加颗粒物导致的死亡风险^[21-22, 24, 30]; 1 篇文献认为每日气温的变异性即每日气温的极差是影响颗粒物与死亡的重要温度条件^[25]。

PM_{10} 与气温对人群健康的影响交互作用可能存在年龄、性别差异。分别各有 3 篇文献亚组分析结果显示, PM_{10} 与高温的交互作用在老年人群(≥ 65 周

岁)^[14, 24, 28]或女性人群^[24, 26, 28]中更强; 1 篇文献研究结果显示男性更容易受 PM₁₀ 与低温交互作用的影响^[24]。2 篇文献讨论了颗粒物与气温的交互作用的地域差异^[16, 32]; 其中 1 篇文献研究结果显示 PM₁₀ 与低温的交互作用对南方城市居民总死亡率的影响更大^[16], 另 1 篇文献则认为相同温度水平下, PM_{2.5} 暴露对北方城市居民死亡的影响高于南方城市^[32]。

meta 分析结果显示在低、高、中温层, PM₁₀ 每上

升 10 μg·m⁻³, 非意外总死亡风险增加百分比及其 95%CI 分别为 0.39%(-0.10%~0.88%)、2.30%(1.34%~3.26%)、0.33%(0.06%~0.61%); PM_{2.5} 每上升 10 μg·m⁻³, 非意外总死亡风险增加百分比及其 95%CI 分别为 0.37%(0.27%~0.47%)、2.56%(2.00%~3.13%)、0.45%(0.36%~0.55%)。相较于中温条件, 高温条件下 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度增加对非意外总死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡风险的影响均较高(见表 2)。

表 1 纳入的大气污染与气温交互作用研究的文献特征

Table 1 Descriptive information for all included studies on the synergistic effect between air pollution and temperature

序号	作者	发表年份	研究时间	研究地区	污染物	温度截点	结局指标
1	Qian, 等 ^[12]	2008	2000—2004	武汉	PM ₁₀ , O ₃ , SO ₂ , NO ₂	P ₅ , P ₉₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡, 脑卒中、心脏病、心肺疾病死亡
2	Lin, 等 ^[13]	2009	1990—1999	高雄	CO	P ₂₅ , P ₇₅	非意外总死亡和心血管系统疾病死亡
3	Li, 等 ^[14]	2011	2007—2009	天津	PM ₁₀	14.65, 20 °C	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡, 心肺疾病、脑卒中、缺血性心脏病死亡
4	Cheng, 等 ^[15]	2012	2001—2004	上海	PM ₁₀ , O ₃ , SO ₂ , NO ₂	P ₁₅ , P ₈₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
5	Meng, 等 ^[16]	2012	2001—2008	8个城市	PM ₁₀	P ₅ , P ₉₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
6	Liu, 等 ^[17]	2013	2006—2018	广州	O ₃	P ₂₅ , P ₇₅	非意外总死亡
7	Chen, 等 ^[18]	2013	2008—2009	苏州	O ₃	P ₂₅ , P ₇₅	非意外和心血管系统疾病死亡
8	Li, 等 ^[19]	2013	2004—2009	北京	PM _{2.5}	P ₂₅ , P ₇₅	呼吸系统疾病死亡
9	Li, 等 ^[20]	2014	2005—2009	广州	PM ₁₀	P ₅ , P ₉₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡, 心肺疾病死亡
10	Li, 等 ^[21]	2015	2005—2009	北京	PM _{2.5}	P ₂₅ , P ₇₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
11	Li, 等 ^[22]	2015	2003—2011	广州	PM ₁₀	P ₁₀ , P ₉₀	总死亡、非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
12	Sun, 等 ^[23]	2015	1999—2011	香港	PM _{2.5}	22, 25 °C	总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
13	朱耀辉, 等 ^[24]	2016	2002—2010	武汉	PM ₁₀	低温<-0.21 °C, 高温≥33.4 °C	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
14	Luo, 等 ^[25]	2017	2008—2011	北京、南京、成都	PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂	温度变异性大小	心血管系统疾病死亡
15	Qin, 等 ^[26]	2017	2008—2014	合肥	PM ₁₀ , SO ₂ , NO ₂	P ₅ , P ₉₅	总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
16	Chen, 等 ^[27]	2017	2011—2014	成都	SO ₂	P ₂₅ , P ₇₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
17	Tian, 等 ^[28]	2018	2006—2009	北京	PM ₁₀	15.9, 20 °C	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
18	Duan, 等 ^[29]	2019	2013—2017	深圳	NO ₂	24.8 °C	心血管系统疾病死亡
19	Mokoena, 等 ^[30]	2020	2014—2016	西安	PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂	低温<-8 °C, 高温≥34 °C	心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
20	Shi, 等 ^[31]	2020	2013—2018	全国128个点	O ₃	P ₂₅ , P ₇₅	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
21	Zhang, 等 ^[32]	2020	2014—2016	15个城市	PM _{2.5}	P ₁₀ , P ₉₀	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
22	Zhang, 等 ^[33]	2020	2010—2016	北京	PM _{2.5} , PM _{2.5-10} , BC	22, 24, 26, 28 °C	非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
23	张莹, 等 ^[34]	2020	2010—2016	北京	PM _{2.5} , BC	24 °C	心血管系统疾病、呼吸系统疾病死亡
24	欧奕含, 等 ^[35]	2021	2014—2015	西安	PM _{2.5} , BC	26 °C	心、脑血管系统疾病死亡
25	张莹, 等 ^[36]	2021	2014—2016	成都	PM _{2.5} , O ₃	22.2 °C	心、脑血管系统疾病死亡
26	谢昀霏, 等 ^[37]	2021	2006—2016	广州	O ₃ , NO ₂	25.7, 27.3 °C	心、脑血管系统疾病死亡
27	Gao, 等 ^[38]	2022	2012—2019	深圳	NO, NO ₂ , NO _x	24.8 °C	心血管系统疾病死亡

2.3 O₃ 与气温的交互作用

27 篇文献中共有 8 篇文献分析了 O₃ 与气温的交互作用^[12, 15, 17-18, 30-31, 36-37]。3 篇文献认为在低温或冷季时 O₃ 导致的死亡效应更强^[15, 17-18], 4 篇文献认为高温

与 O₃ 存在交互作用^[12, 31, 36-37], 1 篇文献认为高温与低温均能增加 O₃ 导致的死亡效应^[30]。其中 1 篇文献分析了 O₃ 与气温交互作用的年龄差异, 结果显示 O₃ 与高温的交互作用对老年人群(≥65 周岁)影响更大^[31]。

表 2 PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、SO₂、NO₂ 每上升 10 μg·m⁻³ 在不同温度分层下对特定死因死亡率的综合影响

Table 2 Summary of pooled effects of PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, and NO₂ on cause-specific mortalities at different temperature strata (percent change in mortality per 10 μg·m⁻³ increment)

指标	气温	研究数	OR (95%CI) /%	I ² /%	P
PM₁₀					
非意外总死亡	低	3	0.39(-0.10~0.88)	0.40	0.835
	高	3	2.30(1.34~3.26)	0.00	<0.001
	中	3	0.33(0.06~0.61)	77.40	—
心血管系统疾病死亡	低	4	0.43(0.33~0.54)	29.60	0.555
	高	4	1.23(0.64~1.82)	89.30	0.003
	中	4	0.42(0.29~0.56)	70.30	—
呼吸系统疾病死亡	低	4	0.48(0.06~0.89)	62.80	0.670
	高	4	1.42(0.63~2.22)	77.90	0.020
	中	4	0.57(0.36~0.78)	69.40	—
PM_{2.5}					
非意外总死亡	低	2	0.37(0.27~0.47)	26.60	0.214
	高	2	2.56(2.00~3.13)	94.90	<0.001
	中	1	0.45(0.36~0.55)	0.00	—
心血管系统疾病死亡	低	5	0.39(0.27~0.52)	35.70	0.649
	高	5	2.37(1.64~3.12)	98.50	0.000
	中	3	0.19(-0.68~1.06)	99.70	—
呼吸系统疾病死亡	低	5	0.60(0.43~0.77)	71.50	0.622
	高	5	2.14(1.03~3.25)	97.40	0.008
	中	3	0.64(0.57~0.72)	0.00	—
O₃					
非意外总死亡	低	2	0.12(0.05~0.18)	8.50	0.874
	高	2	0.74(-0.12~1.61)	60.20	0.311
	中	2	0.29(0.20~0.38)	0.00	—
心血管系统疾病死亡	低	4	1.38(0.66~2.10)	92.70	0.056
	高	4	0.71(0.43~1.00)	72.20	0.620
	中	3	0.60(0.26~0.94)	77.40	—
呼吸系统疾病死亡	低	4	1.41(0.58~2.24)	73.50	0.055
	高	4	0.71(0.46~0.97)	55.90	0.397
	中	3	0.40(0.20~0.59)	0.00	—
SO₂					
非意外总死亡	低	3	2.46(0.84~4.10)	94.30	0.056
	高	3	0.30(-2.71~3.42)	93.20	0.817
	中	3	0.68(-0.17~1.53)	87.60	—
心血管系统疾病死亡	低	4	2.16(1.30~3.03)	85.00	0.017
	高	4	-0.08(-1.71~1.57)	90.70	0.216
	中	4	0.99(0.57~1.42)	58.00	—
呼吸系统疾病死亡	低	4	2.73(1.32~4.17)	89.50	0.040
	高	4	0.61(-1.93~3.21)	91.00	0.780
	中	4	0.99(0.14~1.86)	75.50	—
NO₂					
非意外总死亡	低	2	1.94(0.32~3.59)	0.00	0.883
	高	2	5.48(0.46~10.74)	0.00	0.157
	中	2	1.81(1.25~2.38)	0.00	—
心血管系统疾病死亡	低	3	1.72(1.44~2.00)	49.10	0.024
	高	3	1.04(0.65~1.43)	0.00	0.292
	中	3	1.29(1.04~1.54)	0.00	—
呼吸系统疾病死亡	低	3	1.65(1.16~2.13)	0.00	0.398
	高	3	1.11(0.40~1.82)	7.20	0.535
	中	3	1.37(0.94~1.80)	5.80	—

表 2 显示了 meta 分析汇总结果: 在低、高、中温层, O₃ 每上升 10 μg·m⁻³, 非意外总死亡风险增加百分比及其 95%CI 分别为 0.12%(0.05%~0.18%)、0.74%(-0.12%~1.61%)、0.29%(0.20%~0.38%)。不同温度层下 O₃ 对人群死亡的影响差异无统计学意义。

2.4 SO₂ 与气温的交互作用

6 篇文献讨论了 SO₂ 与气温的交互作用。1 篇文献研究结果显示 SO₂ 与高温存在交互作用^[26], 2 篇文献结果显示 SO₂ 与高温和低温均存在交互作用^[27, 30], 其余 3 项研究没有观察到不同温度分层下 SO₂ 对死亡影响的差异^[12, 15, 25]。

meta 分析结果显示在低、高、中温层, SO₂ 每上升 10 μg·m⁻³, 心血管系统疾病死亡风险增加百分比及其 95%CI 分别为 2.16%(1.3%~3.03%)、-0.08%(-1.71%~1.57%)、0.99%(0.57%~1.42%); 呼吸系统疾病死亡风险增加百分比及其 95%CI 分别为 2.73%(1.32%~4.17%)、0.61%(-1.93%~3.21%)、0.99%(0.14%~1.86%)。相对于中温条件, 低温时 SO₂ 浓度增加对心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病死亡风险的影响较高(见表 2)。

2.5 NO₂ 与气温的交互作用

7 篇文献讨论了 NO₂ 与气温的交互作用。2 篇文献结果显示低温可增加 NO₂ 导致的心血管死亡风险^[29, 38], 且 NO₂ 与气温的交互作用对男性死亡影响更加明显^[29]。其余研究没有观察到不同温度分层下 NO₂ 与气温交互作用的差异。

meta 分析结果显示在低、高、中温层, NO₂ 每上升 10 μg·m⁻³, 心血管系统疾病死亡风险增加百分比及其 95%CI 分别为 1.72%(1.44%~2.00%)、1.04%(0.65%~1.43%)、1.29%(1.04%~1.54%)。低温时 NO₂ 浓度增加对心血管系统疾病死亡的影响相对于中温条件更高(见表 2)。

2.6 其他大气污染与气温的交互作用

仅检索到 1 篇讨论 CO 与气温交互作用的文献^[13], 文献报告高温可增加 CO 导致的非意外总死亡风险, 而低温增加 CO 引起的心血管死亡风险。

2.7 敏感性分析

筛选采用相同的滞后天数(lag0-1)、温度分层(P₂₅, P₇₅)的文献进行亚组分析, 亚组分析中气温与大气污染物交互作用结果趋势与整体趋势一致。

2.8 偏倚风险评价

纳入的 27 篇文献中, 选择性偏倚、结果测量、选择性报告三个维度的风险评估均为低风险, 有 22 篇文献(81.48%)的混杂偏倚维度被评估为中风险, 其主

要原因是未报告调整混杂因素后的残差情况。6 篇文献(22.22%)的缺失数据维度被评为中风险,10 篇文献(37.04%)被评为高风险,其主要原因是缺失数据比例超过 10%或未报告缺失数据的处理方式(见图 2)。

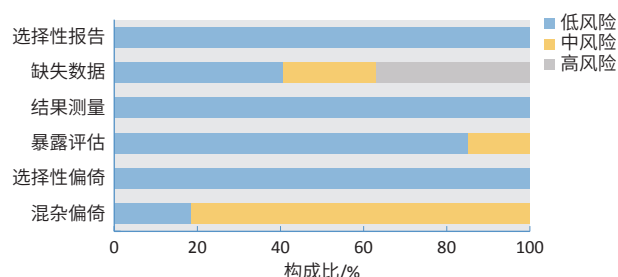


图 2 纳入文献偏倚风险评价结果

Figure 2 Bias risk assessment of all included studies

3 讨论

本研究结果证实了 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 与气温对人群死亡的交互作用,具体而言高温能增加 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 导致的非意外总死亡、心血管系统疾病死亡和呼吸系统疾病的死亡风险,而低温条件下 SO_2 、 NO_2 对心血管系统疾病死亡风险的影响更强,但未观察到不同温度层下 O_3 与气温对人群死亡影响交互作用的差异。这可能与国内针对污染物与气温交互作用的公开发表文献数量有限,缺乏足够数据进行更加细致的亚组分析有关。

大气污染物和气温之间互相影响,并共同作用于人体健康。一方面气温可影响大气污染物的浓度和分布,例如:持续高温会促进大气中的光化学反应,导致 O_3 、 $PM_{2.5}$ 等大气污染物生成增加^[39];持续低温可能导致石油产品燃烧排放更多的有毒副产品如 NO_2 ^[29]。另一方面大气污染物浓度水平又会影响气温的变化,例如:颗粒物可以通过对光的散射和吸收作用影响大气温度。同时,气温与大气污染物对人群健康的影响存在共同生物学机制,极端气温会加剧炎症反应,引发血管内皮细胞损伤,引起胆固醇水平升高,血液黏度增加和凝血功能改变,引发一系列人体健康效应^[40-42]。大气污染物暴露同样会诱导氧化应激,引发内皮功能障碍、血管炎症,导致心率、血压变化以及组织器官的损伤^[43-45]。可以推测,气温与空气污染物对人体健康影响存在交互作用,气温可以改变空气污染物对疾病死亡率的影响,因此有必要进一步加强大气污染物与气温交互作用对人群健康影响的相关研究。

本研究 meta 分析中部分结果存在较大异质性, SO_2 与各温度层交互作用分析的异质性均超过 70%,

排除 Chen 等^[27]的研究结果后,各层异质性均下降到 50%以下,提示该文献是导致异质性的主要来源,排除该文献后 SO_2 与气温的交互作用趋势不变。颗粒物、臭氧与气温交互作用的异质性来源更为复杂,逐篇排除文献后异质性未得到明显改善。异质性的可能来源如下:首先,不同城市和气候区域人群的暴露模式存在差异^[22]。南方冬季的气温更加温和,人们更愿意进行户外活动,从而增加人群的大气污染物暴露水平,因此在南方地区能观察到更多的低温与大气污染物的交互作用。其次,北方城市的气温变化范围更广,北方人对极端炎热的气温适应能力更强,可能导致气温与大气污染物的交互作用在南方更强^[32]。第三,由于当地的排放源、气象、植被类型分布等因素,不同地区大气污染物的来源和化学组分差异较大。北方城市颗粒物的主要来源是煤炭燃烧、交通尾气及沙尘暴,硝酸盐和硫酸盐浓度较高;南方城市颗粒物主要来源于汽车尾气、煤炭燃烧、工业排放和生物质燃烧,元素碳、有机碳和重金属含量较高,而碳颗粒可能比硫酸盐、硝酸盐和沙尘颗粒更具毒性^[46-47]。

综上所述,大气污染物与气温对人群健康的影响存在交互作用,评估环境风险因素与健康效应之间的暴露反应关系时综合考虑这种交互作用,对开展污染防治和疾病防控工作具有重要指导意义。目前,大气污染物与气温对健康的交互作用研究在我国仍处于探索阶段,现有文献尚未完全阐明气温与大气污染物的共同暴露对人类健康的潜在影响,后续应鼓励开展更多相关研究,丰富研究数据,为明确大气污染物和气温在不同地区和人群中的交互作用模式提供证据,为制定区域性公共卫生政策提供指导建议。

参考文献

- [1] WHO. Ten threats to global health in 2019[R]. Geneva: WHO, 2019.
- [2] COHEN AJ, BRAUER M, BURNETT R, et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J]. *Lancet*, 2017, 389(10082): 1907-1918.
- [3] RENZI M, STAFIOGGIA M, FAUSTINI A, et al. Analysis of temporal variability in the short-term effects of ambient air pollutants on nonaccidental mortality in Rome, Italy (1998-2014)[J]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125(6): 067019.
- [4] SCHWARTZ J, FONG K, ZANOBBETTI A. A national multicity analysis of the causal effect of local pollution, NO_2 , and $PM_{2.5}$ on mortality[J]. *Environ Health Perspect*, 2018, 126(8): 087004.
- [5] REN M, LI N, WANG Z, et al. The short-term effects of air pollutants on respiratory disease mortality in Wuhan, China: comparison of time-series and case-crossover analyses[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 40482.

- [6] BUNKER A, WILDENHAIN J, VANDENBERGH A, et al. Effects of air temperature on climate-sensitive mortality and morbidity outcomes in the elderly: a systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence[J]. *EBioMedicine*, 2016, 6: 258-268.
- [7] DADBAKHSH M, KHANJANI N, BAHRAMPOUR A, et al. Death from respiratory diseases and temperature in Shiraz, Iran (2006–2011)[J]. *Int J Biometeorol*, 2017, 61(2): 239-246.
- [8] ANDERSON BG, BELL ML. Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States[J]. *Epidemiology*, 2009, 20(2): 205-213.
- [9] CHEN K, WOLF K, BREITNER S, et al. Two-way effect modifications of air pollution and air temperature on total natural and cardiovascular mortality in eight European urban areas[J]. *Environ Int*, 2018, 116: 186-196.
- [10] SCORTICHINI M, DE SARIO M, DE'DONATO F K, et al. Short-term effects of heat on mortality and effect modification by air pollution in 25 Italian cities[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15(8): 1771.
- [11] WHO. Risk of bias assessment instrument for systematic reviews informing who global air quality guidelines[R]. Geneva: World Health Organization, 2020.
- [12] QIAN Z, HE Q, LIN HM, et al. High temperatures enhanced acute mortality effects of ambient particle pollution in the "oven" city of Wuhan, China[J]. *Environ Health Perspect*, 2008, 116(9): 1172-1178.
- [13] LIN CM, LIAO CM. Temperature-dependent association between mortality rate and carbon monoxide level in a subtropical city: Kaohsiung, Taiwan[J]. *Int J Environ Health Res*, 2009, 19(3): 163-174.
- [14] LI G, ZHOU M, CAI Y, et al. Does temperature enhance acute mortality effects of ambient particle pollution in Tianjin City, China[J]. *Sci Total Environ*, 2011, 409(10): 1811-1817.
- [15] CHENG Y, KAN H. Effect of the interaction between outdoor air pollution and extreme temperature on daily mortality in Shanghai, China[J]. *J Epidemiol*, 2012, 22(1): 28-36.
- [16] MENG X, ZHANG Y, ZHAO Z, et al. Temperature modifies the acute effect of particulate air pollution on mortality in eight Chinese cities[J]. *Sci Total Environ*, 2012, 435-436: 215-221.
- [17] LIU T, LI TT, ZHANG YH, et al. The short-term effect of ambient ozone on mortality is modified by temperature in Guangzhou, China[J]. *Atmos Environ*, 2013, 76: 59-67.
- [18] CHEN K, YANG HB, MA ZW, 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.
- [19] LI P, XIN J, WANG Y, et al. The acute effects of fine particles on respiratory mortality and morbidity in Beijing, 2004–2009[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20(9): 6433-6444.
- [20] LI G, JIANG L, ZHANG Y, et al. The impact of ambient particle pollution during extreme-temperature days in Guangzhou City, China[J]. *Asia Pac J Public Health*, 2014, 26(6): 614-621.
- [21] LI Y, MA Z, ZHENG C, et al. Ambient temperature enhanced acute cardiovascular-respiratory mortality effects of PM_{2.5} in Beijing, China[J]. *Int J Biometeorol*, 2015, 59(12): 1761-1770.
- [22] LI L, YANG J, GUO C, et al. Particulate matter modifies the magnitude and time course of the non-linear temperature-mortality association[J]. *Environ Pollut*, 2015, 196: 423-430.
- [23] SUN S, CAO P, CHAN KP, et al. Temperature as a modifier of the effects of fine particulate matter on acute mortality in Hong Kong[J]. *Environ Pollut*, 2015, 205: 357-364.
- [24] 朱耀辉, 吴然, 钟佩榕, 等. 武汉市江岸区温度在大气颗粒物短期暴露对居民死亡影响的修饰效应[J]. *中华预防医学杂志*, 2016, 50(6): 519-524. ZHU YH, WU R, ZHONG PR, et al. Temperature modifies the acute effect of particulate air pollution on mortality in Jiang'an district of Wuhan[J]. *Chin J Prev Med*, 2016, 50(6): 519-524.
- [25] LUO K, LI R, WANG Z, et al. Effect modification of the association between temperature variability and daily cardiovascular mortality by air pollutants in three Chinese cities[J]. *Environ Pollut*, 2017, 230: 989-999.
- [26] QIN RX, XIAO C, ZHU Y, et al. The interactive effects between high temperature and air pollution on mortality: a time-series analysis in Hefei, China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 575: 1530-1537.
- [27] CHEN F, QIAO Z, FAN Z, et al. The effects of Sulphur dioxide on acute mortality and years of life lost are modified by temperature in Chengdu, China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 576: 775-784.
- [28] TIAN L, LIANG F, GUO Q, et al. The effects of interaction between particulate matter and temperature on mortality in Beijing, China[J]. *Environ Sci Process Impacts*, 2018, 20(2): 395-405.
- [29] DUAN Y, LIAO Y, LI H, et al. Effect of changes in season and temperature on cardiovascular mortality associated with nitrogen dioxide air pollution in Shenzhen, China[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 697: 134051.
- [30] MOKOENA KK, ETHAN CJ, YU Y, et al. Interaction effects of air pollution and climatic factors on circulatory and respiratory mortality in Xi'an, China between 2014 and 2016[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(23): 9027.
- [31] 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.
- [32] ZHANG Y, WANG S, ZHANG X, et al. Temperature modulation of the adverse consequences on human mortality due to exposure to fine particulates: a study of multiple cities in China[J]. *Environ Res*, 2020, 185: 109353.
- [33] ZHANG Y, ZHANG X, FAN X, et al. Modifying effects of temperature on human mortality related to black carbon particulates in Beijing, China[J]. *Atmos Environ*, 2020, 243: 117845.
- [34] 张莹, 辛金元, 张小玲, 等. 北京市气温与黑碳和PM_{2.5}对疾病死亡影响的交互效应[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(7): 3179-3187. ZHANG Y, XIN JY, ZHANG XL, et al. Interaction effects between ambient temperature and black carbon and PM_{2.5} on mortality in Beijing[J]. *China Environ Sci*, 2020, 40(7): 3179-3187.
- [35] 欧奕含, 张小玲, 张莹, 等. 西安BC、PM_{2.5}与气温协同对心脑血管疾病死亡的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4415-4425. OU YH, ZHANG XL, ZHANG Y, et al. Influence of BC, PM_{2.5}, temperature and their synergy on mortality of cardiovascular diseases in Xi'an[J]. *China Environ Sci*, 2021, 41(9): 4415-4425.
- [36] 张莹, 辛金元, 马盼, 等. 成都市气温与PM_{2.5}和O₃交互作用对疾病死亡人数的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3887-3895. ZHANG Y, XIN JY, MA P, et al. Interaction effects between ambient temperature and PM_{2.5} and O₃ on mortality in Chengdu[J]. *China Environ Sci*, 2021, 41(8): 3887-3895.
- [37] 谢昀霏, 宋晓明, 方嘉堃, 等. 广州市氧化性污染物与气温对居民心脑血管疾病死亡风险的交互作用[J]. *环境与职业医学*, 2021, 38(11): 1199-1206. XIE YF, SONG XM, FANG JK, et al. Interaction between oxidant pollutants and ambient temperature on cardio-cerebrovascular mortality risks in Guangzhou, China[J]. *J Environ Occup Med*, 2021, 38(11): 1199-1206.

(下转第 1044 页)