



# 温度修饰的臭氧短期暴露对我国当前及未来健康损害的影响

朱佳, 冯子珈, 陈磊, 廖宏\*

南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044

\* 联系人, E-mail: hongliao@nuist.edu.cn

2023-12-30 收稿, 2024-02-25 修回, 2024-03-05 接受, 2024-04-12 网络版发表

国家自然科学基金(42293323, 42007195, 42305121)、国家重点研发计划(2019YFA0606804, 2022YFE0136100)和江苏省自然科学基金(BK20220031)资助

**摘要** 系统评估我国当前及未来臭氧短期暴露导致的全疾病非意外过早死亡人数, 并量化气候变暖背景下, 温度对臭氧暴露健康损害的修饰效果, 具有重要的公共卫生意义. 2013~2021年我国臭氧日最大8 h平均浓度(MDA8 O<sub>3</sub>)来自TAP(Tracking Air Pollution in China)数据集, 未来2030和2060年臭氧浓度来自CMIP6(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6)模拟的不同社会发展路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)的结果. 2013~2021年, 温度修饰下我国臭氧短期暴露导致的过早死亡人数为114.9千人(95%CI: 90.1~139.9千人), 与未考虑温度修饰的影响相比, 其效果使过早死亡人数增加1022人(95%CI: 638~4875人), 且主要叠加在臭氧健康损害的高风险地区. 温度恶化的臭氧健康损害会在暖季影响至全国, 7月份的温度修饰效应最大, 贡献16%(2227人(95%CI: 2188~2378人))的过早死亡人数. 相较于2021年, SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下, 我国2030和2060年因臭氧短期暴露导致的过早死亡人数均显著增加, 主要原因是浓度升高和老龄人口恶化. 其中, 温度修饰的最大贡献可达8.3%. 但在SSP1-2.6, 我国未来臭氧健康损害持续下降, 主要原因是减少的臭氧浓度. 其中, 温度的修饰效果也因臭氧浓度的降低而减弱, 甚至改善健康损害, 说明持续改善臭氧空气质量既能减少臭氧暴露的危害, 也能减弱未来更暖气候背景下温度的修饰效果.

**关键词** 臭氧, 短期暴露, 过早死亡人数, 温度修饰作用, 气候变化

空气污染是全球重要环境问题, 被列为影响人类健康的第四大风险因素. 全球疾病负担指出, 2019年全球超过670万人的过早死亡源于大气污染暴露<sup>[1]</sup>. 我国是典型的发展中国家, 正面临严峻的大气污染问题<sup>[2,3]</sup>. 近些年, 臭氧已成为我国主要大气污染物之一, 且浓度持续升高<sup>[4,5]</sup>. 《中国生态环境状况公报》显示, 全国臭氧日最大8 h平均值第90百分位数浓度从2015年的134  $\mu\text{g m}^{-3}$ 增长到2022年的145  $\mu\text{g m}^{-3}$ , 增长趋势为

0.6  $\mu\text{g m}^{-3} \text{ a}^{-1}$ . 高浓度臭氧污染会对我国人体健康产生危害<sup>[6,7]</sup>.

大量研究指出臭氧短期暴露与过早死亡之间存在密切关联<sup>[8~11]</sup>. Chen等人<sup>[12]</sup>基于2013~2018年全国323个县的臭氧浓度数据和特定死因的死亡人数开展两阶段的时间序列研究并发现, 臭氧短期暴露和血液循环系统疾病存在显著关联, 即每增加10  $\mu\text{g m}^{-3}$ 的臭氧浓度, 循环系统疾病的死亡风险增加0.11%(95%置信范

引用格式: 朱佳, 冯子珈, 陈磊, 等. 温度修饰的臭氧短期暴露对我国当前及未来健康损害的影响. 科学通报, 2025, 70: 3629–3641

Zhu J, Feng Z J, Chen L, et al. Current and future temperature-modified short-term effect of ozone on health burden in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3629–3641, doi: 10.1360/TB-2023-1360

围: 0.04%~0.17%)。Ye等人<sup>[13]</sup>检索1990~2020年发表的相关文献并通过Meta分析探索我国臭氧短期暴露与死亡率之间的关系, 研究结果表明, 臭氧浓度每增加  $10 \mu\text{g m}^{-3}$ , 呼吸系统疾病的死亡率增加0.23%(95%置信范围: -0.20%~0.66%)。暴露响应系数的确定有助于进一步揭示臭氧污染所造成的过早死亡人数<sup>[14~16]</sup>。Xiao等人<sup>[17]</sup>根据流行病学研究得到的短期暴露与总死亡率之间的关系<sup>[18]</sup>, 结合近实时空气污染物浓度(Tracking Air Pollution in China, TAP)数据, 分析2013~2020年我国臭氧短期暴露健康损害的变化情况, 结果表明, 因臭氧浓度升高, 年均过早死亡人数从2013~2017年的56.7千人增加到2018~2020年的80.3千人。

近地面的臭氧浓度主要来自化学生成, 即氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)在强光照和高气温的条件下发生的光化学反应<sup>[19]</sup>。因此, 气温的高低会影响臭氧的浓度<sup>[20]</sup>, 以及臭氧污染的健康危害<sup>[21]</sup>。但以往大部分的研究在探讨臭氧暴露对人体健康的影响时, 往往把温度作为混杂因素, 忽略了温度的修饰效果, 进而低估疾病负担的真实影响<sup>[22]</sup>。流行病学研究指出, 温度对臭氧与过早死亡之间的关联存在调控作用, 即随着温度的升高, 臭氧健康危害效应增强<sup>[23,24]</sup>。Chen等人<sup>[25]</sup>基于时间序列研究, 聚焦2013~2018年我国华北平原, 通过构建温度校正和温度交互的两阶段统计模型发现, 不考虑温度修饰时, 臭氧短期暴露对非意外疾病死亡风险的响应系数为0.15% (95%置信区间: 0.06%~0.24%), 但当考虑温度修饰作用后, 在高温背景下, 臭氧的急性死亡率显著增加至0.57%(95%置信区间: 0.43%~0.71%)。

虽然已有一些研究明确揭示了温度修饰下短期臭氧暴露与过早死亡率之间的响应系数<sup>[26,27]</sup>, 但还没有相关研究进一步定量分析温度修饰下我国臭氧短期暴露导致的过早死亡人数, 以及温度修饰的贡献, 包括在时间和空间尺度上的表现。与此同时, 在气候变暖的大背景下, 未来温度将持续升高<sup>[28]</sup>, 量化温度对臭氧暴露健康影响的修饰效果, 对缓解未来空气污染及其暴露的健康损害具有重要的公共卫生意义。因此, 本研究将基于高精度的TAP数据集, 定量评估当前(2013~2021年)我国臭氧短期暴露导致的全疾病非意外过早死亡人数, 以及温度对臭氧暴露的修饰作用, 并进一步利用世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)耦合模式比较计划第六版(Coupled Model Inter-

comparison Project Phase 6, CMIP6)数据, 预估我国未来(2030和2060年)臭氧短期暴露的健康损害, 以及温度的调控效果。

## 1 数据和方法

### 1.1 臭氧短期暴露的健康损害模型

为计算我国每年因臭氧短期暴露所导致的非意外全疾病健康损害, 我们采用对数线性的浓度响应函数量化每日的过早死亡人数, 进而对所有天数求和得到年度过早死亡总数。参照Wang等人<sup>[29]</sup>、Liu等人<sup>[14]</sup>和Xiao等人<sup>[17]</sup>的分析方法, 具体计算公式如下:

$$\text{Mort}_{y,d,a,g} = \frac{\text{BMP}_{y,a}}{N} \times \text{Pop}_{y,a,g} \times \left(1 - \frac{1}{\text{RR}_{y,d,g}}\right), \quad (1)$$

其中,  $\text{Mort}_{y,d,a,g}$ 表示第 $y$ 年、第 $d$ 天、第 $a$ 个年龄段和第 $g$ 个网格上的过早死亡人数;  $\text{BMP}_{y,a}$ 表示第 $y$ 年和第 $a$ 个年龄段的非意外全疾病基准死亡率;  $N$ 表示第 $y$ 年的天数;  $\text{Pop}_{y,a,g}$ 为第 $y$ 年、第 $a$ 个年龄段和第 $g$ 个网格上的人口数;  $\text{RR}_{y,d,g}$ 是第 $y$ 年、第 $d$ 天和第 $g$ 个网格上的相对危害。相对危害的计算公式如下:

$$\text{RR}_{y,d,g} = e^{(\beta \times \max(C_{y,d,g} - C_0, 0))}, \quad (2)$$

其中,  $C_{y,d,g}$ 表示第 $y$ 年、第 $d$ 天和第 $g$ 个网格上的臭氧日最大8 h平均浓度(MDA8  $\text{O}_3$ )。  $C_0$ 表示临界危害的浓度阈值, 即当 $C_{y,d,g}$ 小于 $C_0$ 时, 臭氧短期暴露不会对人体健康产生危害。我们根据Chen等人<sup>[12]</sup>针对全国323个县所开展的时间序列研究而得到的结论将 $C_0$ 设定为  $67.5 \mu\text{g m}^{-3}$ 。  $\beta$ 为每日非意外全疾病的浓度响应因子。Shi等人<sup>[27]</sup>利用中国疾病预防控制中心所提供的2013~2018年我国128个县每日慢性非传染性疾病数据开展时间序列分析, 探究大气温度的对我国臭氧短期暴露与非意外死亡率之间的关系, 结果表明, 当不考虑温度对臭氧短期暴露健康损害的修饰作用时, 臭氧浓度每增加  $10 \mu\text{g m}^{-3}$ , 死亡风险增加0.37%(95%置信区间: 0.29%~0.44%), 但当考虑温度的修饰效应时, 低温(四分之一分位数以下)、中温(四分之一分位数至四分之三分位数)和高温条件下(四分之三分位数以上), 臭氧浓度每增加  $10 \mu\text{g m}^{-3}$ , 每日非意外总死亡率分别增加-0.07%(95%置信区间: -0.21%~0.07%)、0.36%(95%置信区间: 0.27%~0.46%)和0.44%(95%置信区间: 0.36%~0.51%)。因此, 我们选用Shi等人<sup>[27]</sup>的结论, 并设定不同的 $\beta$ 值(表1), 通过两个试验(BaseCase和TempCase)来定

表 1 不同温度修饰案例下浓度响应因子的取值情况<sup>a)</sup>

Table 1 Different values of concentration response factor ( $\beta$ ) under cases with (TempCase) and without (BaseCase) temperature-modified effect

| 案例名称     | 作用        | 浓度响应因子 $\beta$             |                              |                          |
|----------|-----------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| BaseCase | 不考虑温度修饰作用 | 0.37%(0.29%~0.44%)         |                              |                          |
| TempCase | 考虑温度修饰作用  | 低温 (<25th <sup>*</sup> )   | 中温 (25th~75th <sup>*</sup> ) | 高温 (>75th <sup>*</sup> ) |
|          |           | -0.07%**<br>(-0.21%~0.07%) | 0.36%<br>(0.27%~0.46%)       | 0.44%<br>(0.36%~0.51%)   |

a) \* 25th和75th分别表示每个目标地区的四分之一和四分之三分位数的日均温度。 \*\* 根据Olstrup等人<sup>[30]</sup>和Yazdi等人<sup>[31]</sup>, 负值表示在该温度段下臭氧暴露不对健康产生影响

量分析温度修饰的臭氧短期暴露过早死亡人数, 以及健康损害对温度修饰的响应程度。

根据公式 $Mort_y = \sum_g \sum_d (\sum_a Mort_{y,d,a,g})$ , 最终可以量化我国每年因臭氧短期暴露所导致的非意外全疾病过早死亡人数。与此同时, 为获得过早死亡人数的不确定性(即95%置信区间, 记为95%CI), 我们根据Silva等人<sup>[32]</sup>以及Dang和Liao<sup>[33]</sup>的做法, 从浓度响应因子 $\beta$ 的正态分布中随机抽样并开展1000次蒙特卡洛模拟计算得到。

## 1.2 臭氧浓度和近地面气温

为准确分析臭氧短期暴露对我国当前2013~2021年的健康影响, 我们选用高分辨率(空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 时间分辨率为1 d)、长时间尺度(2013~2021年)的MDA8 O<sub>3</sub>浓度数据集: Tracking Air Pollution in China (TAP) (<http://tapdata.org.cn/>)。该数据是融合了区域气象与通用多尺度空气质量耦合模型(weather research and forecasting-community multiscale air quality, WRF-CMAQ)的模拟结果, 以及中国环境监测总站(China National Environmental Monitoring Centre, CNEMC)站点观测和OMI卫星遥感的多源数据集。详细的数据融合步骤参见Xue等人<sup>[34]</sup>和Xiao等人<sup>[17]</sup>。与站点观测和卫星反演的结果相比, 网格化的MDA8 O<sub>3</sub>数据具有更完整的时空覆盖; 与模型模拟结果相比, 由于排放清单存在一定偏差和物理化学参数化方案不够真实, 基于多源数据融合的MDA8 O<sub>3</sub>浓度在探究臭氧健康影响方面表现出更优异的性能<sup>[35]</sup>。图S1展示了2013~2021年TAP MDA8 O<sub>3</sub>和实际观测的臭氧浓度的比较情况。

为了进一步确定未来情境下温度修饰的臭氧短期暴露给我国居民带来的健康影响, 我们选择了2030和

2060年来开展未来的分析。未来2030和2060年的MDA8 O<sub>3</sub>浓度数据来自CMIP6在不同共享社会路径(shared socioeconomic pathways, SSPs)情景的模拟结果(<https://esgf-index1.ceda.ac.uk/search/cmip6-ceda/>)。SSP情景是对CMIP5实验中使用的代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCP)排放情景的更新, 旨在实现一定程度气候减缓的社会经济发展路径<sup>[36,37]</sup>。我们下载4种SSP情景(低排放情景SSP1-2.6、中等排放情景SSP2-4.5、地区竞争情景SSP3-7.0和高排放情景SSP5-8.5)下5个CMIP6模式(CESM2-WACCM、GFDL-ESM4、UKESM1-0-LL、MPI-ESM-1-2-HAM和EC-Earth3-AerChem)模拟的小时臭氧浓度数据来计算每日MDA8 O<sub>3</sub>, 并通过多模式集合平均预估未来不同情景下臭氧短期暴露所造成的过早死亡人数的变化情况, 以及温度的修饰效应对健康损害变化的影响。图1(a)展示了4种不同情景下我国2030和2060年多模式集合平均的MDA8 O<sub>3</sub>浓度较2021年的演变情况, 图S2给出了各个CMIP6模式在所有情景下预估的未来臭氧浓度的变化情况。SSP1-2.6和SSP2-4.5情景下模拟的臭氧浓度逐渐下降, 而SSP3-7.0和SSP5-8.5情景的臭氧浓度持续增加。表S1详细列出了未来我国MDA8 O<sub>3</sub>的数据来源。

为量化大气温度对臭氧暴露健康危害的修饰效果, 我们参照Shi等人<sup>[27]</sup>, 以日均温度作为考量标准开展研究。2013~2021年的日均气温数据来自美国国家环境预报中心再分析资料(National Centers for Environmental Prediction/Final Analysis, NCEP/FNL, ds083.2) (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>), 目的是与TAP数据集的主要源数据之一, 数值模式WRF-CMAQ的初始气象输入场保持一致<sup>[38]</sup>。未来不同情景的近地面气温数据与未来MDA8 O<sub>3</sub>的数据来源完全一致(表S1)。图1(b)详细展示了不同情景下我国2030和2060年日均气



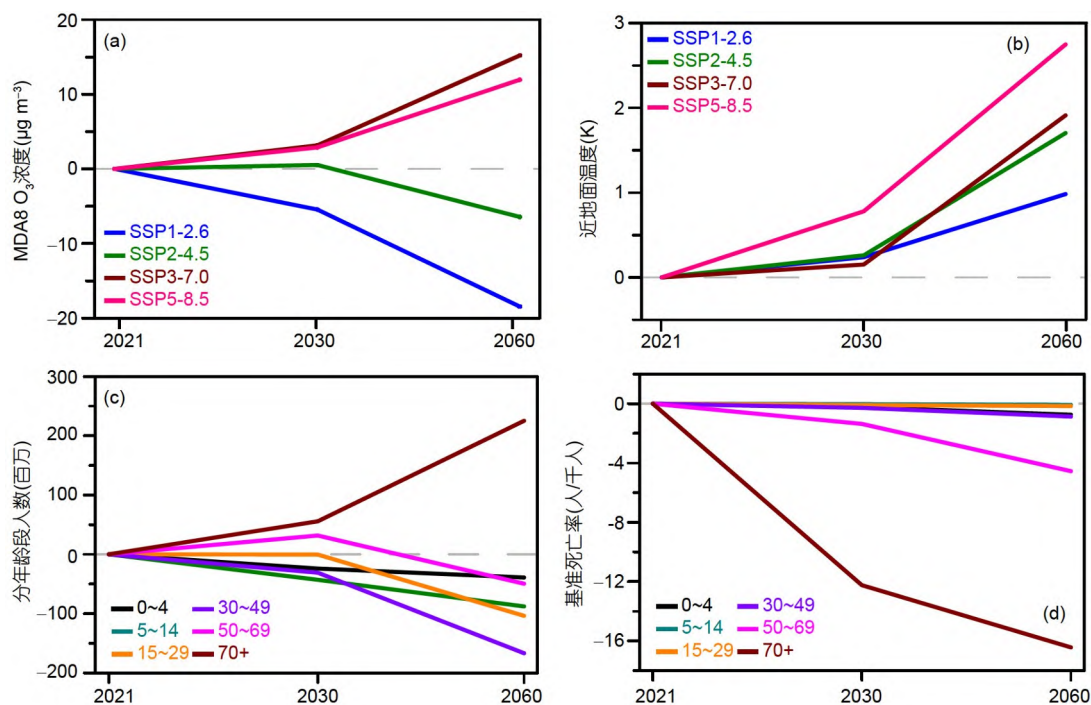


图1 (网络版彩色)我国未来2030和2060年(a)MDA8 O<sub>3</sub>浓度、(b)气温、(c)分年龄段人数和(d)分年龄段基准死亡率较2021年的变化情况  
Figure 1 (Color online) Future changes in (a) MDA8 O<sub>3</sub> concentrations, (b) air temperature, (c) age-specific population, and (d) age-specific baseline mortality rates in years 2030 and 2060 relative to 2021

温较2021年的变化特征。所有情景的结果均表示我国未来的大气温度将持续升高。图S3也给出了各个CMIP6模式在所有情景下预估的未来气温的变化情况。

### 1.3 人口和年龄结构

结合LandScan(<https://landscan.ornl.gov/>)提供的网格人口数据以及中国统计年鉴(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>)汇总的分省分年龄段人口数据,我们可以获得2013~2021年我国分年龄段网格人口数。年龄结构共包括6段,分别为:0~4、5~14、15~29、30~49、50~69以及70岁以上。未来2030和2060年的全国分年龄段人口数据来自人口金字塔(<https://www.populationpyramid.net/china/2030/>)。假设2021年到2060年每个网格人口数占中国当年总人数的比例不变,同时我们将2030(2060)年全国分年龄段人口数与2021年的网格比例相乘,即可得到2030(2060)年的分年龄段网格人口数。相似的做法参照Chen等人<sup>[35]</sup>。图1(c)给出了我国2030和2060年各年龄段人数较2021年的变化情况。可以发现,未来我国老年人口(70岁以上)将显著增加。

### 1.4 基准死亡率数据

2013~2021年全国尺度的分年龄段非意外全疾病基准死亡率数据来自全球疾病负担(<http://ghdx.health-data.org/gbd-results-tool>)。该研究中心提供的最新基准死亡率数据只到2019年,因此在本研究中,2020和2021年的基准死亡率仍然沿用2019年的数据。未来预测的各年龄段非意外全疾病基准死亡率数据可以从世界卫生组织的全球卫生估计中获取(<https://colinmathers.com/2022/05/10/projections-of-global-deaths-from-2016-to-2060>)。图1(d)对比了2021和2030年及2060年各年龄段基准死亡率数据。可以发现,由于医疗水平的提高,我国未来非意外全疾病基准死亡率在所有年龄段内都显著下降,尤其体现在老年阶段(70岁以上)。

## 2 研究结果

### 2.1 臭氧暴露和温度的关系

图S4反映了MDA8 O<sub>3</sub>浓度和日均气温的相关情况。从图S4(a)中可以发现,臭氧浓度随着温度的增加近似呈现线性的变化特征,相关系数的平方( $R^2$ )为0.95,

且通过99%的显著性检验。从空间分布上来看(图S4(b)), 全国绝大部分地区臭氧浓度和温度呈现显著的正相关( $P<0.01$ ), 表明高温背景下, 大气臭氧浓度也很高。

为定量探究温度对臭氧短期暴露健康影响的修饰效果, 我们首先分析臭氧过度暴露随温度高低的变化情况。图2展示了在不同温度段下, 我国臭氧浓度的年均累计过度暴露情况。为便于比较, 我们将表1中的三个温度段进一步细分为四个, 即低温(<25th)、中低温(25th~50th)、中高温(50th~75th)和高温(>75th), 它们分别表示温度数值处于整个时间序列的四分之一分位数以下、四分之一到一半分位数、一半到四分之三分位数, 以及四分之三分位数以上。过度暴露是指超过临界阈值的那部分臭氧浓度, 即每日MDA8  $O_3$ 浓度减去 $C_0$ 。将全年每日的过度暴露求和, 即为当年的累计过度暴露浓度。从图中我们可以发现, 在低温段(图2(a)), 全国大部分区域过度暴露的臭氧浓度普遍很低(小于 $5 \mu g m^{-3}$ ), 且高值主要集中在我国人口稀疏的西部地区(青海和西藏), 而随着温度数值的增加, 我国臭氧过度暴露浓度显著变大, 尤其体现在人口密集的东部。以高温段为例(图2(d)), 高暴露浓度主要集中在华北平原, 年均累计最大可超过 $10000 \mu g m^{-3}$ 。

浓度的过度暴露表征臭氧污染的潜在危害, 人口加权的过度暴露可进一步反映臭氧污染对人体健康的影响。从图2中我们可以发现, 在低温段, 我国人口加权的年均累计过度暴露浓度仅为 $313.6 \mu g m^{-3}$ , 而在高温段, 该数值增加了10倍以上, 为 $3696.5 \mu g m^{-3}$ , 说明温度越高, 臭氧的过度暴露越明显, 带来的健康影响越严峻, 进而也能反映温度对臭氧暴露和人体健康的关系存在修饰作用。

相似的现象同样出现在未来2030和2060年(图S5)。即使采取不同的社会发展路径(SSP1-2.6情景、SSP2-4.5情景、SSP3-7.0情景和SSP5-8.5), 所有SSP情景均表明温度越高, 人口加权的累计过度暴露浓度越大。

## 2.2 温度修饰作用下2013~2021年我国臭氧短期暴露的健康损害

图3展示了我国臭氧短期暴露导致的过早死亡人数的时空分布特征, 以及温度对臭氧健康影响的修饰作用。从图3(a)中我们可以发现, 臭氧短期暴露带来的健康损害主要分布在华北平原、长江三角洲地区、珠江三角洲地区和川渝盆地等人口密集且臭氧浓度较高的区域。全国过早死亡人数从2013年的82.5千人(95%CI: 64.7~100.5千人)增加到2021年的143.4千人(95%CI: 112.6~174.5千人), 增长趋势为10.1千人/年(95%CI: 8.0~12.3千人/年), 9年平均的过早死亡人数为114.9千人(95%CI: 90.1~139.9千人)(图3(c))。差值图可以表明(图3(b)), 温度的修饰作用会进一步恶化臭氧的影响, 尤其体现在健康损害的高风险地区。考虑温度的修饰作用后, 2013至2021年间我国因臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数平均增加1.0千人(95%CI: 0.6~4.9千人)(图3(c))。

分省份分析我们可以发现(图4), 相较于传统算法(即不考虑温度的修饰作用, 记为BaseCase, 表1), 考虑温度调控下的年均臭氧暴露健康损害将在我国长江以北的省市变得更加严峻, 如山东、河南和河北, 过早死亡人数分别增加700人(95%CI: 570~1170人)、650人(95%CI: 550~1040人)和510人(95%CI: 430~820人)。这种负面效果会在暖季节(5到9月)进一步蔓延至几乎全

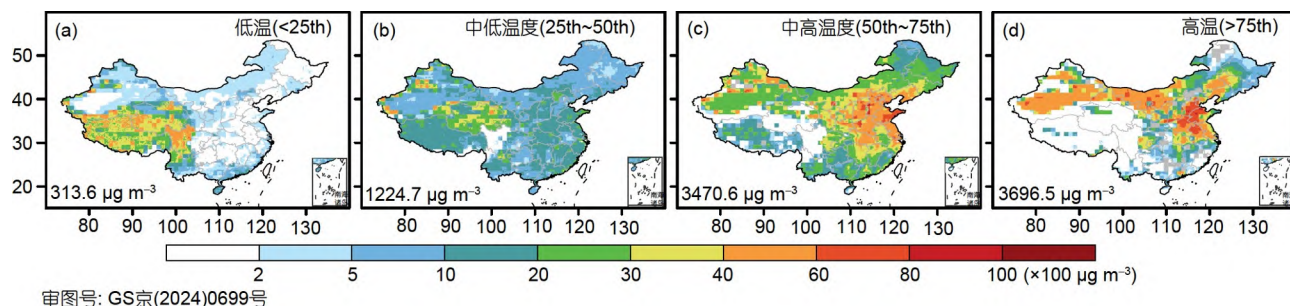


图2 (网络版彩色)不同温度分段下, 2013~2021年我国臭氧年均累计过度暴露浓度的空间分布图。(a) 低温段(温度数值处于整个时间序列的四分之一分位数以下); (b) 中低温段(温度数值处于整个时间序列的四分之一到一半分位数); (c) 中高温段(温度数值处于整个时间序列的一半到四分之三分位数); (d) 高温段(温度数值处于整个时间序列的四分之三分位数以上)。右下角数值表示人口加权的年均累计过度暴露浓度

Figure 2 (Color online) Spatial distribution of annual mean cumulative ozone overexposure concentration in China during 2013–2021 under different temperature segments. (a) Low temperature (< 25th); (b) low-middle temperature (25th–50th); (c) middle-high temperature (50th–75th); (d) high temperature (> 75th). Population-weighted annual mean cumulative ozone overexposure concentrations are also shown at the bottom of each panel

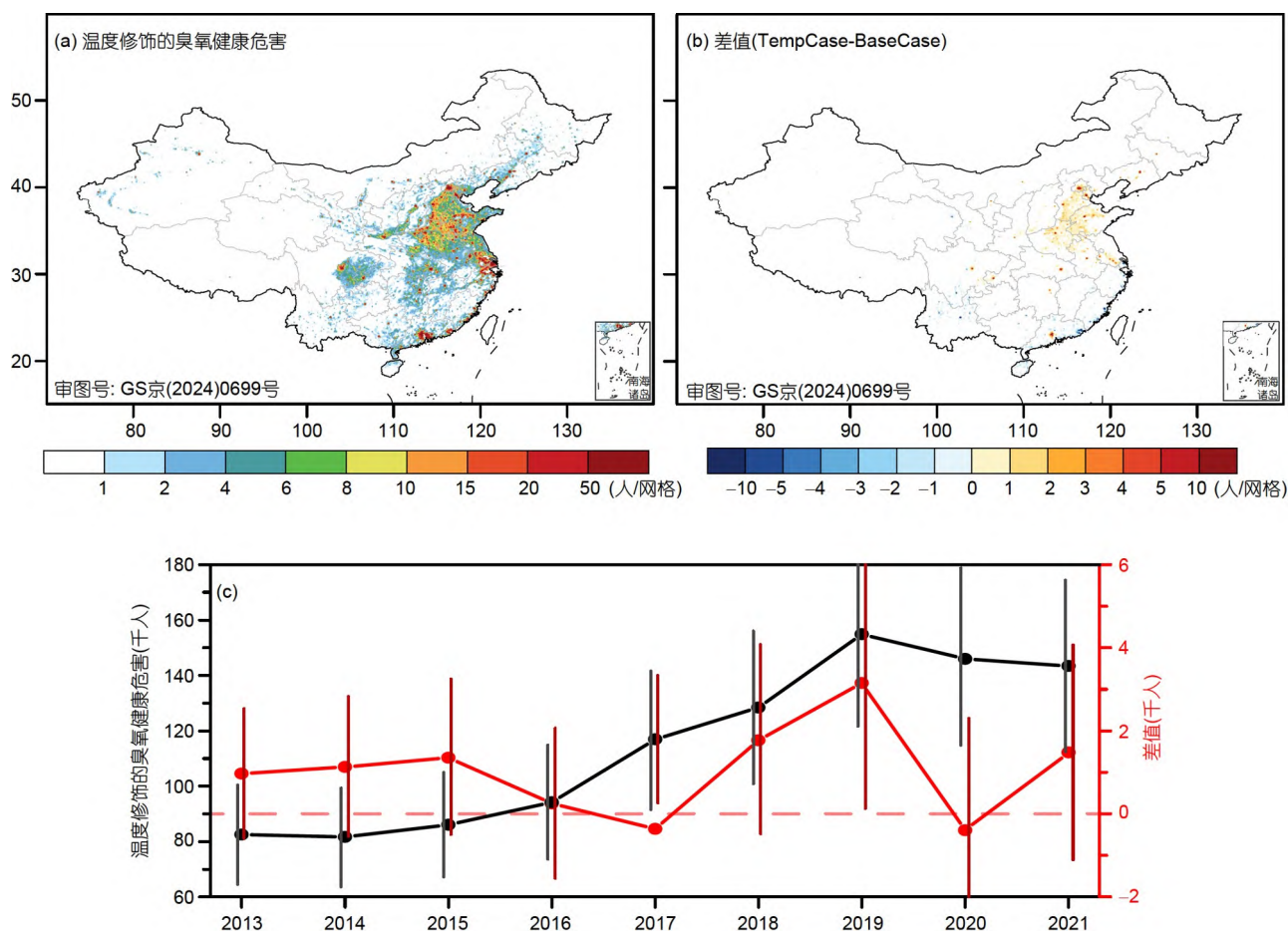


图3 (网络版彩色)臭氧短期暴露过早死亡人数的时空分布及温度对臭氧健康影响的修饰效果。(a) 温度修饰作用下2013~2021年我国年均臭氧暴露健康损害的空间分布图;(b) 考虑和不考虑温度修饰作用下2013~2021年我国年均过早死亡人数变化的空间分布图;(c) 我国因臭氧短期暴露导致的过早死亡人数的逐年变化曲线,黑色点线表示温度修饰的臭氧短期暴露影响,红色点线表示考虑与不考虑温度调整的臭氧暴露健康危害差异,误差条表示95%的置信区间

**Figure 3** (Color online) Spatial-temporal distribution of premature mortality due to short-term ozone exposure and the contribution of temperature-modified effect to health damage. (a) Spatial distribution of 9-year-mean temperature-modified short-term effect of ozone on health burden during 2013–2021. (b) Spatial distribution of the contribution of temperature-modified effect to premature deaths averaged over 2013–2021. (c) Yearly variation of ozone-related health burden from 2013 to 2021, the black dotted line represents the premature deaths due to short-term ozone exposure modified by temperature, and the red dotted line represents the difference in health hazards of ozone exposure with and without considering temperature adjustment, the error bars mean 95% confidence interval

国所有省市,其中以广东、浙江和四川等地的响应最为明显。根据过早死亡人数的逐月变化情况(图5),我们还可以总结出,温度调整的影响将显著放大高风险季节(如暖季节)的臭氧暴露健康危害,尤其体现在7月,全国过早死亡人数从BaseCase的14.4千人(95%CI: 11.3~17.1千人),增加到TempCase(考虑温度的修饰影响,表1)的16.7千人(95%CI: 13.5~19.5千人),增涨16.0%。

为更详细地突出温度的修饰效果,针对全国尺度,我们进一步量化了临界温度,即某一天的日均气温大于该临界温度时,温度将作为修饰因子提升臭氧暴露

导致的死亡风险。根据图6(a),我们可以计算得到,当日均气温大于293 K时,相较于传统算法,温度的修饰作用会放大臭氧的健康危害。因为温度和臭氧浓度呈现显著正相关(图S4),我们也从浓度的角度量化了临界浓度,即某一天的MDA8  $O_3$ 浓度大于该临界数值时,大气温度将作为修饰因子加强臭氧暴露与过早死亡之间的关联。从图6(b)中我们可以发现,当臭氧浓度超标时,即日均MDA8  $O_3$ 浓度大于国家一级标准( $100 \mu g m^{-3}$ ),健康损害除了来自臭氧暴露的直接危害,还会进一步叠加温度对臭氧暴露健康影响的修饰作用。



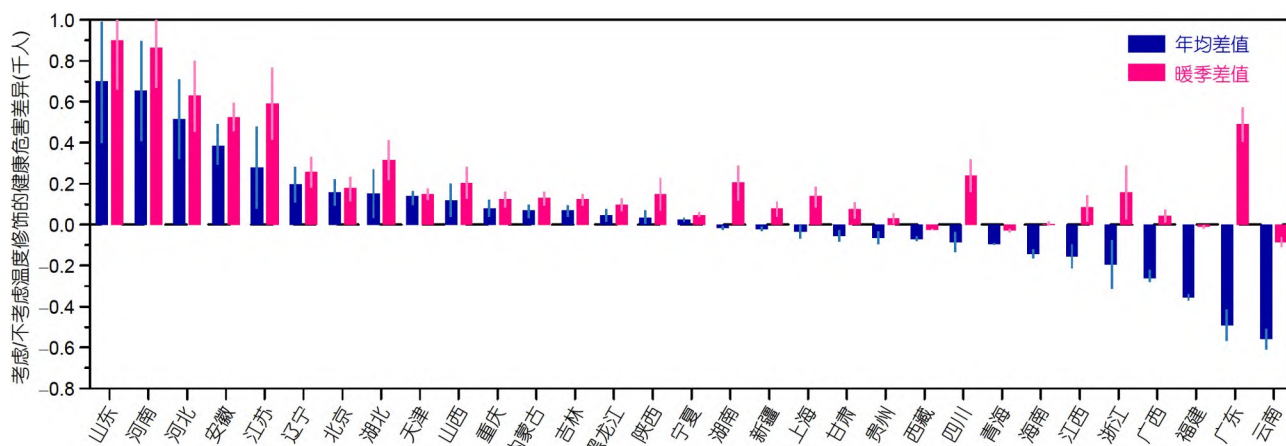


图4 (网络版彩色)考虑和不考虑温度修饰的臭氧短期暴露健康影响在各个省份的变化情况。蓝色柱表示2013~2021年的年均差异,红色柱表示2013~2021年的暖季差异,误差条表示95%的置信区间

Figure 4 (Color online) Yearly (blue bars) and warm-season (red bars) differences of health hazards due to short-term ozone exposure with and without considering the temperature-modified effect in 31 provinces in China during 2013–2021. The error bars mean 95% confidence interval

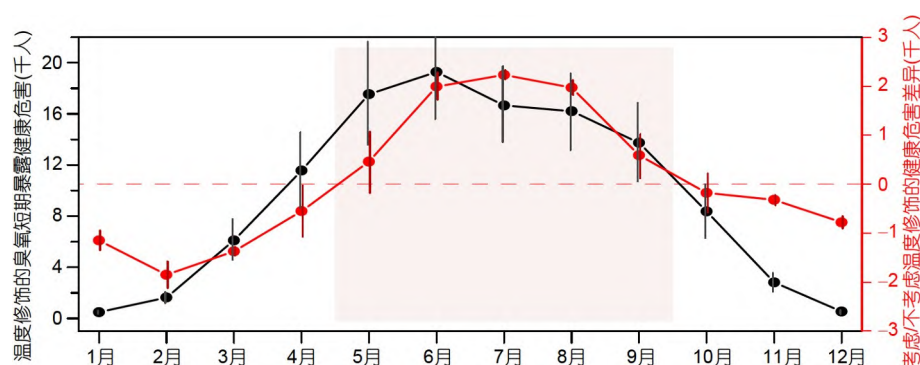


图5 (网络版彩色)2013~2021年我国臭氧短期暴露健康损害的月均变化情况。黑色点线表示温度修饰的臭氧健康危害,红色点线表示考虑与不考虑温度调整的臭氧健康危害差异,背景填充颜色(浅红色)表示暖季节(5~9月),误差条表示95%的置信区间

Figure 5 (Color online) Monthly variation of ozone-related premature deaths averaged over 2013–2021. The black dotted line represents the health hazards due to short-term ozone exposure modified by temperature (left y-axis). The red dotted line represents the difference in health hazards due to short-term ozone exposure with and without considering the temperature-modified effect (right y-axis). The warm season from May to September is shaded by light red. The error bars mean 95% confidence interval

## 2.3 温度修饰作用下未来我国臭氧短期暴露的健康损害

未来不同社会发展路径下我国臭氧浓度的变化,以及人口和年龄结构的改变、医疗水平的改进都将显著影响臭氧短期暴露带来的健康损害。与此同时,温度对臭氧健康影响的修饰效果也会因不同强度的气候变暖而发生改变。因此,我们有必要定量分析未来我国臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数及其变化情况,以及对应的温度修饰效果。

分析图7我们可以发现,在SSP1-2.6情景下(图7(a)),我国2030和2060年因臭氧暴露导致的过早死亡人数较

2021年有明显改善,TempCase (BaseCase)在2030和2060年分别减少7.7(95%CI: 6.1~9.4)(7.0 (95%CI: 5.6~8.2))千人和29.1(95%CI: 23.8~33.8)(24.4 (95%CI: 19.5~28.6))千人,主要原因是MDA8 O<sub>3</sub>浓度和基准死亡率在未来持续下降(图1(a)和(d))。在SSP2-4.5情景下(图7(b)),因臭氧浓度和中老年人数的增加(图1(a)和(c)),导致TempCase和BaseCase计算的2030年过早死亡人数增多,分别增加37.4千人(95%CI: 29.9~44.7千人)和36.6千人(95%CI: 28.8~43.3千人)。虽然2060年的MDA8 O<sub>3</sub>浓度下降,但老龄人口的健康危害主导了全年龄段的过早死亡人数(表S2),因此2060年的臭氧健康损害将比2021年更突出,TempCase和BaseCase计算的过早死

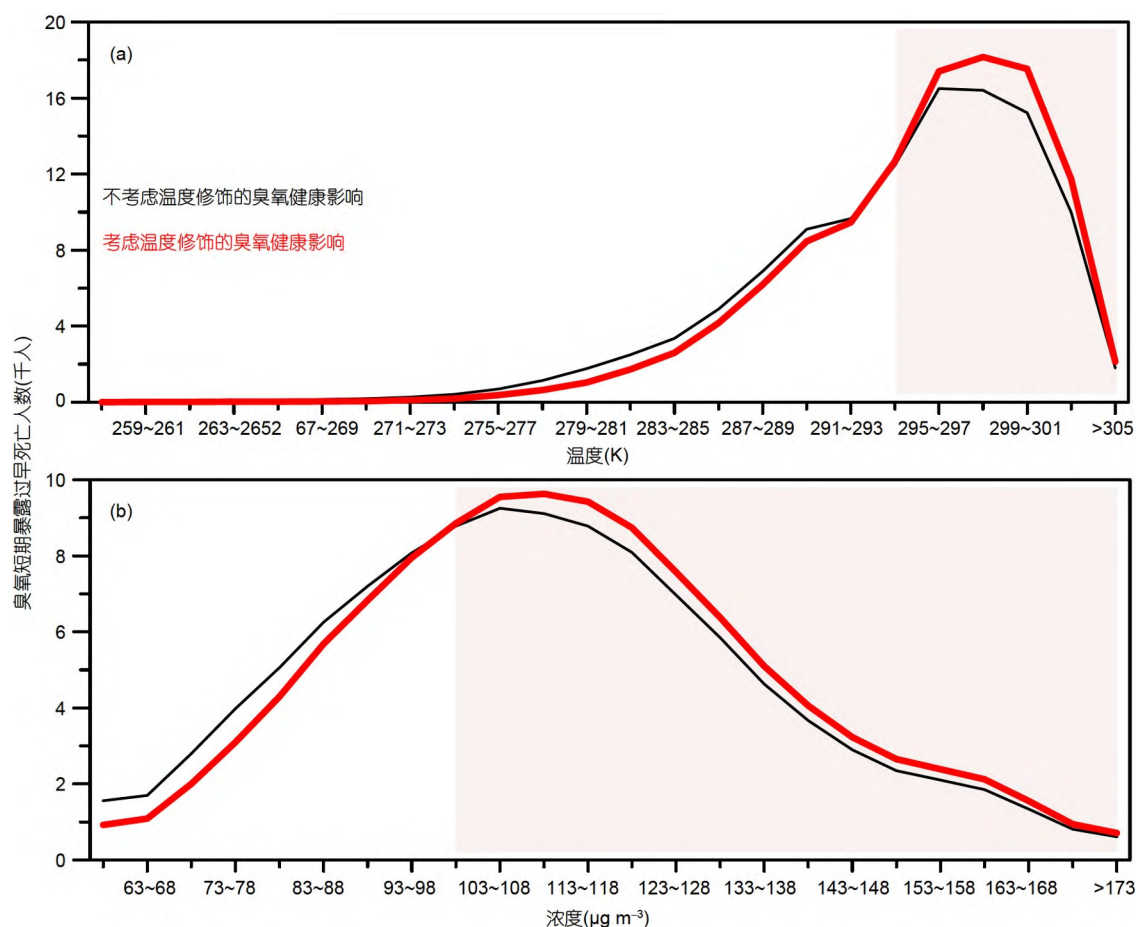


图6 (网络版彩色)2013~2021年我国年均过早死亡人数在(a)不同温度段和(b)不同浓度段的演变情况. 黑色曲线表示不考虑温度修饰的臭氧健康影响, 红色曲线表示考虑温度修饰的臭氧健康影响, 背景填充颜色(浅红色)表示温度调节的正贡献

**Figure 6** (Color online) Evolution characteristics of premature mortalities due to short-term ozone exposure with changes in (a) daily temperature and (b) MDA8 O<sub>3</sub> concentration averaged over 2013–2021. The black (red) curve represents ozone-related health burden without (with) considering the effect of temperature modification. The light-red-shaded area means the positive impact of temperature modification on worsening ozone-related health hazards

亡人数分别增多106.5千人(95%CI: 84.9~127.3千人)和106.1千人(95%CI: 84.0~127.2千人). 对比SSP1-2.6和SSP2-4.5情景下我国臭氧短期暴露健康损害的变化情况可以发现(以2060和2021年的差值为例), 虽然老龄人口在2060年更加突显(图1(c)), 但更显著的臭氧空气质量改善(图1(a))使SSP1-2.6情景下的健康损害改善程度(TempCase减少29.1千人(95%CI: 23.8~33.8千人), BaseCase减少24.4千人(95%CI: 19.5~28.6千人))远大于SSP2-4.5(TempCase增加106.5千人(95%CI: 84.9~127.3千人), BaseCase增加106.1千人(95%CI: 84.0~127.2千人)). 从各年龄段的健康危害变化中我们也可以发现(表S2), 因老年人口占比的增加, SSP1-2.6和SSP2-4.5情景下70岁以上年龄段的健康风险呈现唯一的生长,

但SSP1-2.6情景下更多的臭氧浓度下降显著削弱了2060年老龄化主导的健康损害. 在SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下(图7(c)和(d)), 臭氧浓度的升高, 以及严峻的人口老龄化(图1(a)和(c)), 我国未来因臭氧暴露导致的过早死亡人数将显著高于2021年, 尤其体现在2060年的SSP3-7.0情景, TempCase和BaseCase计算的过早死亡人数分别增加281.2千人(95%CI: 226.2~333.1千人)和264.8千人(95%CI: 208.7~313.4千人).

从图7我们还可以发现, 相比于BaseCase的变化量(变化量是指2030年或2060年较2021年的变化情况), 温度的修饰作用均能放大SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下过早死亡人数的增加量. 但对于SSP1-2.6情景, 虽然未来温度持续升高(图1(b)), 但温度修饰下的健康



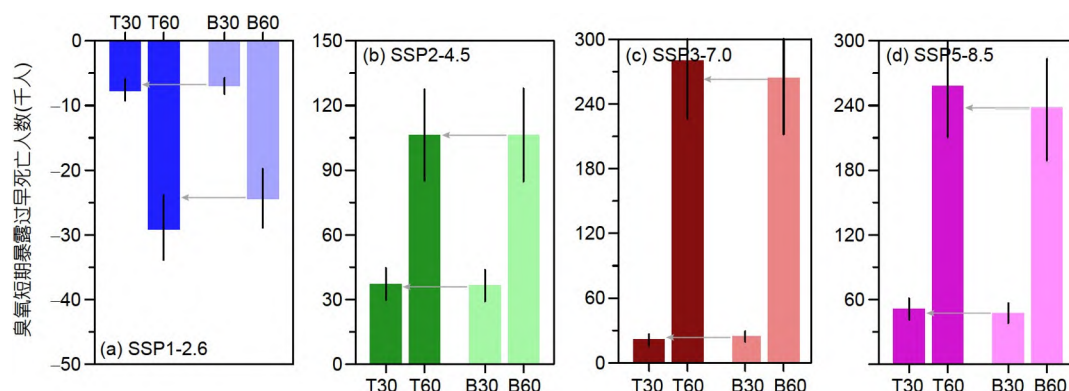


图7 (网络版彩色)未来2030和2060年不同发展路径下臭氧短期暴露健康危害较2021年的变化情况以及温度修饰效果。(a) SSP1-2.6情景;(b) SSP2-4.5情景;(c) SSP3-7.0情景;(d) SSP5-8.5情景。深颜色柱表示考虑了温度的修饰效果(记为T),浅颜色柱表示不考虑温度修饰作用(记为B)。T30(B30)和T60(B60)分别表示2030和2060年较2021年的变化情况。误差条表示95%的置信区间

Figure 7 (Color online) Changes in premature mortalities due to short-term ozone exposure in years of 2030 (left bars) and 2060 (right bars) relative to 2021 under different SSP scenarios with (dark-colored bars) and without (light-colored bars) considering the effect of temperature modification. (a) The scenario of SSP1-2.6; (b) the scenario of SSP2-4.5; (c) the scenario of SSP3-7.0; (d) the scenario of SSP5-8.5. The error bars mean 95% confidence interval

损害变化量小于BaseCase的变化情况,主要原因是SSP1-2.6情景下未来臭氧浓度的显著下降削弱了温度的修饰效果。

因此,我们可以总结出,持续改善臭氧空气质量不仅能直接减少臭氧污染短期暴露导致的过早死亡人数,同时也能减弱未来更暖气候背景下的温度修饰效果,以及减弱老龄化主导的健康损害。

### 3 总结

流行病学研究指出,温度对臭氧与过早死亡之间的关联存在调控作用,即随着温度的升高,臭氧暴露的健康损害增强。与此同时,在气候变暖大背景下,大气温度持续升高,气温对臭氧暴露健康影响的修饰效果也会愈发突显。因此,本研究基于高精度的TAP数据集,定量评估当前(2013~2021年)我国臭氧短期暴露导致的全疾病非意外过早死亡人数,以及温度对臭氧暴露的修饰作用,并进一步利用CMIP6模式模拟的未来不同社会发展路径下的臭氧浓度,预估我国在2030和2060年臭氧短期暴露的健康损害的变化情况,以及温度的调控效果。相关结论具有重要的公共卫生意义。

2013~2021年我国臭氧年均累计过度暴露浓度为 $6925.0 \mu\text{g m}^{-3}$ ,低温段下的暴露集中出现在人口稀疏的西部地区,人口加权的年均累计过度暴露浓度仅为 $313.6 \mu\text{g m}^{-3}$ ,而高温段下的暴露主要覆盖华北平原等人口密集的区域,人口加权的年均累计过度暴露浓度为 $3696.5 \mu\text{g m}^{-3}$ ,说明温度越高,臭氧的暴露程度越大,

带来的健康影响越严峻。

2013~2021年我国因臭氧短期暴露所产生的健康损害显著增加(+10.1千人/年(95%CI: 8.0~12.3千人/年)),9年平均的过早死亡人数为114.9千人(95%CI:90.1~139.9千人),其中温度的修饰作用贡献了1022人(95%CI:638~4875人),且主要集中在我国长江以北的臭氧健康损害的高风险地区,如山东、河南和河北。但在高风险季节(暖季,5~9月),温度恶化臭氧健康影响的效果将蔓延至全国,以7月份为例,温度修饰下全国过早死亡人数增加16%(相比较于无温度修饰),说明温度修饰的效果将显著放大高风险地区和高风险季节的臭氧健康损害。

未来2030和2060年我国因臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数在SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下均比2021年增加(+21.5 ~ +281.2千人),主要原因是升高的MDA8  $\text{O}_3$ 浓度以及恶化的老龄人口。其中,温度修饰的效果贡献了0.4%~8.3%。但在SSP1-2.6情景下,我国未来因臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数较2021年有显著下降(-29.1 ~ -7.0千人),主要原因是改善的臭氧空气质量。温度的修饰效果会因显著下降的臭氧浓度而减弱,甚至促进过早死亡人数的减少,尤其体现在2060年,说明持续改善臭氧空气质量既能直接减少臭氧污染暴露导致的过早死亡人数,也能减弱未来更暖气候背景下温度的修饰效果和老龄化主导的健康损害。

臭氧暴露的健康损害是否存在安全的浓度阈值仍

然有很大争议(<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>). 有研究指出, 臭氧短期暴露与过早死亡之间的响应关系为零阈值<sup>[39,40]</sup>; 也有研究指出, 臭氧健康影响的潜在安全阈值在 $60\sim 100\ \mu\text{g m}^{-3}$ 之间<sup>[9,41]</sup>. 考虑到臭氧短期暴露的健康影响在安全浓度阈值的设定方面存在不确定性, 我们进一步增加了案例分析(表S3), 定量探讨不同 $C_0$ 取值( $0$ 、 $60$ 、 $67.5$ 和 $100\ \mu\text{g m}^{-3}$ )对我国臭氧短期暴露所导致的非意外全疾病过早死亡人数, 以及温度对臭氧暴露的修饰效果的影响情况. 从表S4中我们可以发现, 设定不同的浓度阈值对量化的臭氧暴露健康危害有着显著影响. 阈值越低, 年均(2013~2021年的平均值)过早死亡人数越大. 但针对于温度的修饰效果, 即使选用不同的临界浓度, 温度调整的影响始终会放大高风险季节(5~9月)的臭氧暴露健康危害, 且最大的修饰效果均出现在7月份.

在温度作为修饰因子调整臭氧暴露的健康危害时, 非适宜温度, 尤其是高温条件下高臭氧浓度的协同影响所造成的健康风险也不容忽视. Qi等人<sup>[42]</sup>发现高浓度的臭氧污染可能会加强热浪与脑血管疾病死亡率的关系, 以及当臭氧暴露增加后, 会参与高温环境引起的全身炎症反应, 从而导致全身性炎症的增加. Xu等人<sup>[24]</sup>采用病例交叉设计对江苏省2015~2021年5~9月因心血管疾病死亡的居民进行分析并发现,  $\text{O}_3$ 和热浪暴露与心血管疾病死亡风险升高有关. 同时暴露于 $\text{O}_3$ 和热浪

对心血管疾病死亡风险的影响存在显著协同效应, 且该效应会因 $\text{O}_3$ 暴露水平的升高和热浪强度的增加而增强. 随着天气和气候变化, 臭氧污染和高温热浪的复合暴露事件日趋频繁, 除了定量探究温度修饰的臭氧暴露健康影响, 进一步完善臭氧污染和不适宜温度的协同健康效应, 能够更好地为空气污染和气候变化协同治理提供科学支持.

与此同时, 本文的研究工作也存在一定的局限性: 我国幅员辽阔, 不同地区每日非意外全疾病过早死亡人数、臭氧污染情况、人群暴露程度, 以及大气温度等都不完全一样. 在全国各省市县等地区使用相同的浓度响应因子在计算臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数时会存在一定偏差, 同时也会影响健康损害在温度修饰作用下的响应程度. 在今后的研究工作中, 我们将通过统计方法或文献调研获得地方特异的暴露反应关系, 进而更加精准量化温度修饰下的臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数. 由于各年龄段人数在未来会发生显著改变, 不同年龄段的人群对臭氧暴露的响应强度也将各不相同, 而本研究在当前和未来的所有年龄段都使用相同的浓度响应因子, 会对计算的臭氧短期暴露导致的过早死亡人数及其变化产生影响. 在今后研究中, 我们将获得年龄段特异的暴露反应关系, 定量分析温度修饰下的臭氧短期暴露所导致的疾病负担及其变化.

## 参考文献

- Collaborators G R F. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*, 2020, 396: 1223–1249
- Zhang Q, Zheng Y, Tong D, et al. Drivers of improved  $\text{PM}_{2.5}$  air quality in China from 2013 to 2017. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 244632–4469
- Lyu X, Li K, Guo H, et al. A synergistic ozone-climate control to address emerging ozone pollution challenges. *One Earth*, 2023, 6: 964–977
- Li K, Jacob D J, Liao H, et al. Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 116: 422–427
- Lu X, Zhang L, Wang X, et al. Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013. *Environ Sci Technol Lett*, 2020, 7: 240–247
- Liu Z, Lei Y, Xue W, et al. Mitigating China's ozone pollution with more balanced health benefits. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 7647–7656
- Wang Y, Hu J, Huang L, et al. Projecting future health burden associated with exposure to ambient  $\text{PM}_{2.5}$  and ozone in China under different climate scenarios. *Environ Int*, 2022, 169: 107542
- Liang S, Li X, Teng Y, et al. Estimation of health and economic benefits based on ozone exposure level with high spatial-temporal resolution by fusing satellite and station observations. *Environ Pollution*, 2019, 255: 113267
- Orellano P, Reynoso J, Quaranta N, et al. Short-term exposure to particulate matter ( $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$ ), nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), and ozone ( $\text{O}_3$ ) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 2020, 142: 105876
- Zheng X, Orellano P, Lin H, et al. Short-term exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. *Environ Int*, 2021, 150: 106435

- 11 Guo J, Zhou J, Han R, et al. Association of short-term co-exposure to particulate matter and ozone with mortality risk. *Environ Sci Technol*, 2023, 57: 15825–15834
- 12 Chen C, Li T, Sun Q, et al. Short-term exposure to ozone and cause-specific mortality risks and thresholds in China: Evidence from nationally representative data, 2013–2018. *Environ Int*, 2023, 171: 107666
- 13 Ye W P, Liu M M, Bi J. Meta-analysis of the associations between short-term ozone exposure and human mortality in China. *Acta Sci Circumst*, 2020, 40: 2644–2651
- 14 Liu J, Yin H, Tang X, et al. Transition in air pollution, disease burden and health cost in China: A comparative study of long-term and short-term exposure. *Environ Pollution*, 2021, 277: 116770
- 15 Liu L, Hu L, Liu Y, et al. Modeling of the health impacts of ambient ozone pollution in China and India. *Atmos Environ*, 2021, 267: 118753
- 16 Guan Y, Xiao Y, Zhang N, et al. Tracking short-term health impacts attributed to ambient PM<sub>2.5</sub> and ozone pollution in Chinese cities: An assessment integrates daily population. *Environ Sci Pollut Res*, 2022, 29: 91176–91189
- 17 Xiao Q, Geng G, Xue T, et al. Tracking PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> Pollution and the Related Health Burden in China 2013–2020. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 6922–6932
- 18 Yin P, Chen R, Wang L, et al. Ambient Ozone Pollution and Daily Mortality: A Nationwide Study in 272 Chinese Cities. *Environ Health Perspect*, 2017, 125: 117006
- 19 Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmos Environ*, 2000, 34: 2063–2101
- 20 Liu Y, Geng G, Cheng J, et al. Drivers of increasing ozone during the two phases of clean air actions in China 2013–2020. *Environ Sci Technol*, 2023, 57: 8954–8964
- 21 Kan H, London S J, Chen G, et al. Season, sex, age, and education as modifiers of the effects of outdoor air pollution on daily mortality in Shanghai, China: The Public Health and Air Pollution in Asia (PAPA) Study. *Environ Health Perspect*, 2008, 116: 1183–1188
- 22 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. *Environ Int*, 2018, 116: 186–196
- 23 Li J, Woodward A, Hou X Y, et al. Modification of the effects of air pollutants on mortality by temperature: A systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*, 2017, 575: 1556–1570
- 24 Xu R, Sun H, Zhong Z, et al. Ozone, heat wave, and cardiovascular disease mortality: A population-based case-crossover study. *Environ Sci Technol*, 2024, 58: 171–181
- 25 Chen C, Liu J, Shi W Y, et al. Temperature-modified acute effects of ozone on human mortality — Beijing Municipality, Tianjin Municipality, Hebei Province, and Surrounding Areas, China, 2013–2018. *Chin Center Dis Contr Prevent*, 2021, 3: 964–968
- 26 Ren C, Williams G M, Mengersen K, et al. Does temperature modify short-term effects of ozone on total mortality in 60 large eastern US communities? — An assessment using the NMMAPS data. *Environ Int*, 2008, 34: 451–458
- 27 Shi W, Sun Q, Du P, et al. Modification effects of temperature on the ozone–mortality relationship: A nationwide multicounty study in China. *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 2859–2868
- 28 Zhong S, Huang C. Climate change and human health: Risks and responses (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2002–2010 [钟爽, 黄存瑞. 气候变化的健康风险与卫生应对. *科学通报*, 2019, 64: 2002–2010]
- 29 Wang L, Wei Z, Wei W, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model. *Atmos Environ*, 2015, 122: 723–736
- 30 Olstrup H, Johansson C, Forsberg B, et al. Seasonal variations in the daily mortality associated with exposure to particles, nitrogen dioxide, and ozone in Stockholm, Sweden, from 2000 to 2016. *Atmosphere*, 2021, 12: 1481
- 31 Yazdi M D, Wang Y, Di Q, et al. Long-term effect of exposure to lower concentrations of air pollution on mortality among US Medicare participants and vulnerable subgroups: A doubly-robust approach. *Lancet Planet Health*, 2021, 5: e689–e697
- 32 Silva R A, Adelman Z, Fry M M, et al. The impact of individual anthropogenic emissions sectors on the global burden of human mortality due to ambient air pollution. *Environ Health Perspect*, 2016, 124: 1776–1784
- 33 Dang R, Liao H. Radiative forcing and health impact of aerosols and ozone in China as the consequence of clean air actions over 2012–2017. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 12511–12519
- 34 Xue T, Zheng Y, Geng G, et al. Estimating spatiotemporal variation in ambient ozone exposure during 2013–2017 using a data-fusion model. *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 14877–14888
- 35 Chen L, Liao H, Zhu J, et al. Increases in ozone-related mortality in China over 2013–2030 attributed to historical ozone deterioration and future population aging. *Sci Total Environ*, 2023, 858: 159972
- 36 van Vuuren D P, Kriegler E, O'Neill B C, et al. A new scenario framework for climate Change Research: Scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 2014, 122: 373–386
- 37 Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions



- implications: An overview. *Glob Environ Change*, 2017, 42: 153–168
- 38 Zheng Y X, Xue T, Zhang Q, et al. Air quality improvements and health benefits from China's clean air action since 2013. *Environ Res Lett*, 2017, 12: 114020
- 39 Bell M L, Dominici F, Samet J M. A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study. *Epidemiology*, 2005, 16: 436–445
- 40 Peng R D, Samoli E, Pham L, et al. Acute effects of ambient ozone on mortality in Europe and North America: results from the APHENA study. *Air Qual Atmos Health*, 2013, 6: 445–453
- 41 Stylianou M, Nicolich M J. Cumulative effects and threshold levels in air pollution mortality: Data analysis of nine large US cities using the NMMAPS dataset. *Environ Pollution*, 2009, 157: 2216–2223
- 42 Qi C J, Wang C Y, Wang C L, et al. The modification effect of ozone pollution on the associations between heat wave and cardiovascular mortality. *TIME*, 2023, 1: 100043

## 补充材料

图S1 2013~2021年TAP数据集的MDA8 O<sub>3</sub>浓度和CNEMC站点观测的臭氧浓度的比较

图S2 不同SSP情景下, 各个CMIP6模式模拟的我国未来臭氧浓度演变特征以及相较于2021年的变化程度

图S3 不同SSP情景下, 各个CMIP6模式模拟的我国未来大气温度的演变特征, 以及相较于2021年的变化程度

图S4 2013~2021年我国臭氧浓度和日均气温的相关情况

图S5 未来不同SSP情景下, 温度分段的人口加权累计过度暴露臭氧浓度

表S1 未来2030和2060年我国MDA8 O<sub>3</sub>浓度和近地面气温的来源

表S2 在未来不同社会发展路径下, 2030和2060年我国各年龄段因温度修饰的臭氧短期暴露所导致的过早死亡人数较2021年的变化情况

表S3 不同浓度阈值案例的设置情况

表S4 不同临界危害的浓度阈值下臭氧短期暴露健康影响的变化情况

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “温度修饰的臭氧短期暴露对我国当前及未来健康损害的影响”

# Current and future temperature-modified short-term effect of ozone on health burden in China

Jia Zhu, Zijia Feng, Lei Chen & Hong Liao<sup>\*</sup>

*Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: [hongliao@nuist.edu.cn](mailto:hongliao@nuist.edu.cn)

In recent years, ozone (O<sub>3</sub>) has become one of the major air pollutants in China, and exposure to high concentrations of O<sub>3</sub> pollution is harmful to human health. Epidemiological studies have pointed out that temperature has a regulatory effect on the association between O<sub>3</sub> and premature death. This means that when the temperature rises, the health hazard effect of O<sub>3</sub> exposure also increases. However, most previous studies on the impact of short-term O<sub>3</sub> exposure on human health tend to treat temperature as a confounding factor, ignoring its modifying effect which will underestimate the real impact of O<sub>3</sub>-related disease burden. Some studies have quantitatively identified the corresponding coefficients between short-term O<sub>3</sub> exposure and non-accidental total premature mortality under different temperature stratifications, but there is no study to further quantitatively analyze the number of premature deaths caused by temperature-modified short-term effect of ozone exposure on health burden, as well as the contribution of temperature-modified effect.

Therefore, it is of public health significance to systematically assess the number of all non-accidental premature deaths due to short-term ozone exposure in China at present and in the future, and to quantify the modification effects of temperature on the health damages of ozone exposure under climate warming. The daily maximum 8-hourly average concentrations of ozone (MDA8 O<sub>3</sub>) in China during 2013–2021 are obtained from the high-resolution dataset of TAP (Tracking Air Pollution in China), and the future ozone concentrations for years 2030 and 2060 under different SSPs (shared socioeconomic pathways) are simulated by CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) models. The national annual cumulative excessive exposure concentration of MDA8 O<sub>3</sub> (larger than critical concentration of 67.5 μg m<sup>-3</sup>) averaged over 2013–2021 is 6925.0 μg m<sup>-3</sup>. The ozone exposure at the low (high) temperature strata is found mainly in sparsely populated regions (densely populated regions) with a population-weighted annual cumulative excessive exposure concentration of 313.6 (3696.5) μg m<sup>-3</sup>, which means that the higher the temperature, the more severe impacts of ozone on health. The health impacts of temperature-modified short-term ozone exposure in China during 2013–2021 have increased significantly with the value of 10.1 thousand a<sup>-1</sup> (95%CI: 8.0–12.3 thousand a<sup>-1</sup>); the 9-year average of premature deaths is 114.9 thousand (95%CI: 90.1–139.9 thousand), of which the temperature-modified effect contributes 1022 persons (95% CI: 638–4875 persons), and the impacts are mainly superimposed on areas where ozone-related health damage is large. The modification effects of temperature on the ozone-related mortality sweep across the whole country during the high-risk warm seasons; the largest impact is found in July with the contribution of 16% (2227 persons (95%CI: 2188–2378 persons)). Compared to 2021, all the scenarios of SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 present a significant increase in the number of premature deaths due to short-term ozone exposure in China for years 2030 and 2060 (+21.5 – +281.2 thousand), and the temperature-modified effect can contribute up to 8.3%. The major factors for the increased mortalities are the worsened ozone pollution and the deterioration of population aging. However, under the scenario of SSP1-2.6, due to the improved air quality, the predicted ozone-related premature deaths in years 2030 and 2060 are significantly lower than that in 2021 (–29.1 – –7.7 thousand). Meanwhile, the temperature-modified effects are attenuated under this scenario, even help to improve the health burden, especially in 2060, suggesting that the sustained improvements in ozone air quality will not only reduce the number of premature deaths due to ozone exposure, but also attenuate the modifying effects of temperature under the future climate warming including the impacts of aging-dominated health damages.

**ozone, short-term exposure, premature mortality, temperature-modified effect, climate change**

doi: [10.1360/TB-2023-1360](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1360)