

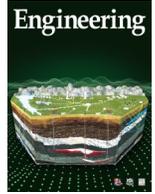


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Environmental Health—Article

## 综合空气污染和非适宜温度相关死亡风险构建空气健康指数

张庆丽<sup>a,#</sup>, 陈仁杰<sup>a,b,#</sup>, 印冠锦<sup>a</sup>, 杜喜浩<sup>a</sup>, 孟夏<sup>a,b</sup>, 邱杨<sup>c</sup>, 阚海东<sup>a,d,\*</sup>, 周脉耕<sup>e,\*</sup>

<sup>a</sup> Key Laboratory of Public Health Safety, Ministry of Education, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China

<sup>b</sup> Shanghai Key Laboratory of Meteorology and Health, Shanghai Meteorological Service & Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China

<sup>c</sup> Department of Environmental Sciences and Engineering, College of Architecture and Environmental Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China

<sup>d</sup> Children's Hospital of Fudan University & National Children's Medical Center, Shanghai 200032, China

<sup>e</sup> National Center for Chronic and Noncommunicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 12 November 2020

Revised 29 April 2021

Accepted 16 May 2021

Available online 2 June 2021

#### 关键词

大气污染

温度

空气健康指数

死亡

时间序列

风险交流

#### 摘要

综合的空气健康指数有助于强调多种大气危险因素的健康风险,有利于向公众传达不良大气环境的总体风险。本文试图通过整合我国大气污染和非适宜温度相关的每日死亡风险,建立一种新的空气健康指数(Air Health Index, AHI)。本研究从时间序列模型中获得了暴露-反应系数,通过将2013—2015年我国272个城市大气污染物与非适宜温度相关的超额死亡风险求和,构建了新的AHI。估计了基于总死亡率构建的AHI(“总AHI”)与全死因死亡率的关系,并进一步比较了“总AHI”与“特异性AHI”(基于疾病别死亡率构建)在预测心肺系统疾病死亡率方面的能力。研究发现,空气污染和非适宜温度与28.23%的每日超额死亡率有关,其中23.47%与非适宜温度有关,其余的与PM<sub>2.5</sub>(1.12%)、NO<sub>2</sub>(2.29%)和O<sub>3</sub>(2.29%)有关。新的AHI采用了10分制的评分标准,272座城市的平均AHI为6分。AHI与死亡率关系的暴露-反应曲线呈线性,不存在阈值。“总AHI”每增加一个单位,全死因死亡率增加0.84%,心血管疾病、冠心病、中风、呼吸系统疾病和慢性阻塞性肺疾病的死亡率分别增加1.01%、0.98%、1.02%、1.66%和1.71%。使用“总AHI”估计疾病别死亡率风险与使用“特异性AHI”预测的疾病别死亡率风险相似。综上所述,本研究提出的“总AHI”可能是一种有前途的风险交流工具,有利于向公众传达与大气环境有关的健康风险。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

大气污染和非适宜温度均与心血管疾病及呼吸系统疾病死亡风险增加有关[1–2]。据估计,2019年空气污染造成我国185万人死亡以及4251万残疾调整寿命年[3]。为了降低与空气污染相关的疾病负担,各国采用空气质量指数(AQI)向公众发布空气污染水平以及相关暴露的健康风险。然而,目前的AQI指数仅由具有最高AQI指数的

空气污染物决定,而没有考虑同时暴露于多种空气污染物对健康的综合影响。

在全球气候变化的背景下,非适宜温度成为全球的健康挑战,特别是在发展中国家。据估计,中国14.33%的非意外死亡是由环境非适宜温度造成的[1]。目前用于指示环境温度造成的健康风险的指数,如热浪指数和寒潮指数只考虑了极端温度[4–5],而未考虑归因于中等非适宜温度所造成的更大的疾病负担。因此,热浪指数和寒潮指

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [kanh@fudan.edu.cn](mailto:kanh@fudan.edu.cn) (H. Kan), [maigengzhou@126.com](mailto:maigengzhou@126.com) (M. Zhou).

# These authors contributed equally to this work.

数可能大大低估了由非适宜温度引起的疾病负担。此外，热浪和寒潮指数是根据每日气温变化来定义的，没有考虑环境温度与人口健康之间的关系。

在真实世界中，人们往往同时暴露于空气污染和大气温度。并且这些环境因素在诱发急性不良健康效应方面有相似的生物学途径，如炎性、氧化应激、生热作用和自主神经功能的变化[6-7]。因此，同时向公众传达空气污染和非适宜温度的健康风险对于保护易感人群来说至关重要。然而，目前还没有任何指数同时考虑非适宜温度和空气污染的综合健康风险。因此，有必要建立一种新的空气健康指数（AHI），将环境空气污染和非适宜温度的健康风险整合起来，以便让公众更好地了解暴露于这些环境因素的整体健康风险，帮助人们有效地减少相关暴露、减轻潜在的危害。

本研究拟利用全国性数据库、综合环境空气污染和非适宜温度导致的死亡风险，建立新的AHI，并评估AHI与我国每日死亡率的关系。新的AHI还将提供每种危险因素导致的每日超额死亡人数。此外，还对基于总死亡率构建的“总AHI”与基于疾病别死亡率构建的“特异性AHI”的预测能力进行比较，以评价针对特定疾病开发“特异性AHI”的必要性。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 数据来源

分析是基于2013年1月1日至2015年12月31日全国272座城市的每日死亡率、空气污染物水平和天气状况数据进行的。关于数据集的详细信息在以往的研究[8-10]中已有详细介绍。简而言之，这272座城市分布在我国31个省级行政区域，人口数量覆盖总人口数量的20%（近2.9亿）。这些城市的每日死亡人数包括全死因死亡人数和疾病别死亡人数；这些数据来自中国疾病监测点系统，该系统在国家级和省级水平上具有较好的代表性[11-12]。

本研究选择了细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）和臭氧（O<sub>3</sub>）作为本次研究的代表性空气污染物。因为之前在同一个数据库中进行的研究发现，这三种污染物与死亡率之间有显著且稳定的关联[8,10,13]。PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>的每日平均浓度以及O<sub>3</sub>的最大8 h平均浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台（<http://106.37.208.233:20035/>）。该平台共有1265个监测站点，截至2015年，每个城市的监测站中位数量为4个（范围为1~7个）。计算这些城市所有有效监测站点的平均值，并将该平均值定义为该城市的每日空气污染物水平。各城市的每日平均气温和平均相

对湿度数据来源于中国气象数据共享服务系统（<http://data.cma.cn/>）。本研究方案获得复旦大学公共卫生学院评审委员会批准（No. 2014-07-0523）。

### 2.2. 数据分析

首先通过时间序列分析获得每日空气污染和非适宜温度与全死因死亡率和死因别死亡率的关系。然后计算这些环境危险因素的每日超额死亡风险。最后将每日超额死亡风险除以最大加权平均超额死亡风险，再乘以10，得到全国AHI。

#### 2.2.1. 时间序列分析

首先，排除了环境空气污染和非适宜温度数据中低于第2.5百分位数或高于第97.5百分位数的日历日，以减少极端值的影响。然后使用标准的时间序列分析获得每日PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>的单位变化相关的死亡率回归系数（1 μg·m<sup>-3</sup>）。关于时间序列分析的细节在之前的研究中有详细的描述[1,8,13]。由于暖季和冷季空气污染物浓度不同，分别计算暖季（5~10月）和冷季（11月至来年4月）空气污染物的相对风险（RR），用于后续计算。协变量包括日历日的自然三次样条平滑函数[每年自由度（DoF）为7]、“星期几”（作为指示变量），以及当天的平均温度（DoF为6）和相对湿度（DoF为3）的自然平滑函数[14]。

对于温度，与之前的研究中所考虑的类似，采用21天移动平均温度，并将全死因死亡风险最低时的温度（即22.8 °C）作为最适宜温度[2]。之前的研究发现，温度和死亡率的暴露-反应曲线呈倒J型，在非最适宜温度时，死亡风险呈近似线性增加[2]。因此，假设温度和死亡率之间的关系是一个以最适宜温度为节点的分段线性函数。根据前期研究估算的极端低温（RR = 1.68）和极端高温（RR = 1.16）的相对风险，利用公式（1）和公式（2）计算单位温度（1 °C）变化相关的每日死亡率增加的系数。

$$\text{Coefficient for Cold} = \ln(1.68)/(22.8 - (-1.4)) \quad (1)$$

$$\text{Coefficient for warm} = \ln(1.16)/(29.0 - 22.8) \quad (2)$$

式中，1.68和1.16分别为与极端低温和极端高温相关的每日总死亡率的相对风险；22.8为最适宜温度；-1.4和29.0分别为极端低温和极端高温的平均值。

#### 2.2.2. 构建全国AHI

之前采用相同数据库进行的研究发现，PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>2</sub>在暴露当天的效应值最大，而O<sub>3</sub>在滞后两天的效应值最大[14]，因此分别采用PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>2</sub>当天以及O<sub>3</sub>滞后两天的RR估计值用于该步骤的计算。首先，利用公式（3）计算各城市空气污染（以0为参考值）和温度（以22.8 °C

为参考值)的每日超额死亡风险。

$$ER_{it} = 100 \cdot (\exp(\beta_i \cdot \Delta x_{it}) - 1) \quad (3)$$

式中,  $ER_{it}$  是第  $t$  天与危险因素  $i$  (空气污染物或温度) 相关的超额死亡率百分比;  $\beta_i$  为回归系数, 表明危险因素  $i$  每变化一个单位 (空气污染物为  $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 温度为  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 每日死亡率的增加量;  $\Delta x_{it}$  是第  $t$  天危险因子  $i$  的水平与参考水平 (空气污染物为 0, 温度为  $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 之间的差值。每日超额死亡风险是所有危险因素的超额死亡风险之和。本研究只针对所有风险因素的数据都完整的日历日进行计算。

接下来, 引入加权平均超额死亡风险, 以减少具有高空气污染水平或极端温度的小城市过度加权产生的影响。具体来说, 分别提取各城市在冷、暖温度时的每日超额死亡率百分比最大值。计算所有城市每日最大值的平均值, 然后分别用每个城市在冷、暖温度时的每日平均死亡人数的平均值进行加权。分别计算冷、暖温度时的加权平均超额死亡风险, 公式如下:

$$c = \sum_{j=1, \dots, n} \left[ \left( m_j / \sum_{j=1, \dots, n} m_j \right) \left( \max_{t=1, \dots, q} \sum_{i=1, \dots, p} ER_{ijt} \right) \right] \quad (4)$$

式中,  $c$  是研究期间 272 座城市的在冷、暖温度时的最大加权平均超额死亡率百分比;  $m_j$  表示在第  $j$  个城市中的每日平均死亡人数;  $ER_{ijt}$  为第  $j$  个城市第  $t$  天第  $i$  个危险因素的超额死亡率百分比。

最后, 用每日超额死亡率百分比除以最大加权平均超额死亡率百分比, 再乘以 10, 得到全国低温和高温时的 AHI, 如公式 (5)。

$$\text{AHI} = (10/c) \cdot (ER_{\text{PM}_{2.5}} + ER_{\text{NO}_2} + ER_{\text{O}_3} + ER_{\text{temp}}) \quad (5)$$

这一过程产生了一系列从 0 到 10+ 的每日 AHI 值, 大于 10 的值表示与这一天空气污染和温度相关的超额死亡风险大于当前数据库中观察到的最大加权平均超额死亡率 (即  $c$ )。为了便于交流, 将 AHI 值进行四舍五入取最接近的整数。

### 2.2.3. AHI 的预测能力评估

通过估算 2013—2015 年我国 272 座城市的 AHI 与当天全死因死亡率和疾病别死亡率的关系, 评估 AHI 在预测死亡率方面的表现。另外, 使用在以往文献中描述的方法绘制全国 AHI 和死亡率的暴露反应曲线[15]。对于可能的非线性关系, 使用 B 样条函数, 在 AHI 的第 25 和第 75 百分位数上设置节点。

在本研究中, 基于总死亡率构建“总 AHI”, 并基于疾病别死亡率 (包括心血管疾病、冠心病、中风、呼吸系统疾病和慢性阻塞性肺病) 构建了“特异性 AHI”。进一

步通过比较回归系数估计值和模型拟合优度 [ $R^2$  和赤池信息准则 (AIC)], 评估“总 AHI”和“特异性 AHI”在预测死因别死亡率方面的表现。此外, 通过将公式 (5) 中的 10 替换为 500, 将 AHI 的尺度调整到 0~500 ( $\text{AHI}_{0-500}$ ), 以便使该指数可与当前的 AQI 进行比较, 并进一步将  $\text{AHI}_{0-500}$  的预测能力与“总 AHI”进行比较。

本研究进行了几项敏感性分析。将时间序列分析中使用的日历日自然三次样条平滑函数的自由度由每年的 7 调整为 8 或 10; 并在 AHI 构建中额外纳入其他空气污染物 ( $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}$ ) 作为代表性污染物。所有统计分析使用 R 软件中的“mgcv”和“tlnise”软件包进行。双侧  $p$  值小于 0.05 认为有统计学意义。估计值以变化的百分比和 95% 置信区间表示。

## 3. 结果

### 3.1. 构建 AHI

本研究共纳入了 272 个城市。表 1 总结了 2013—2015 年我国 272 座城市的每日死亡人数、天气状况和空气污染物水平。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  的年平均值分别为  $56 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $77 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。272 座城市的天气状况各不相同, 平均气温 (年平均) 为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  (范围为  $-0.5 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )。

每日  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  和气温的  $c$  值及回归系数见表 2。暖温度和冷温度时的  $c$  值分别为 18.00 和 66.10。在较暖温度时, 与  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  和温度单位变化相关的全死因死亡率增加的回归系数分别为 0.000171、0.000498、0.000090 和 0.0239; 在较冷温度时分别为 0.000212、0.000724、0.000214 和 0.0214。因此, 给定任何一天和任何一个地点, 较暖和较冷温度时的“总 AHI”分别可以用公式 (6) 和公式 (7) 来计算。

$$\begin{aligned} \text{AHI for warm period} = & (10/18.00) \cdot 100 \cdot \left[ \exp \left( 0.0239 \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. (\text{temperature} - 22.8)_+ \right) - 1 + \exp \left( 0.000171 \cdot \text{PM}_{2.5} \right) - 1 + \right. \\ & \left. \exp \left( 0.000498 \cdot \text{NO}_2 \right) - 1 + \exp \left( 0.000090 \cdot \text{O}_3 \right) - 1 \right] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{AHI for cold period} = & (10/66.10) \cdot 100 \cdot \left[ \exp \left( 0.0214 \cdot (22.8 - \right. \right. \\ & \left. \left. \text{temperature})_+ \right) - 1 + \exp \left( 0.000212 \cdot \text{PM}_{2.5} \right) - 1 + \right. \\ & \left. \exp \left( 0.000724 \cdot \text{NO}_2 \right) - 1 + \exp \left( 0.000214 \cdot \text{O}_3 \right) - 1 \right] \quad (7) \end{aligned}$$

表 3 提供了 AHI 的描述性数据, 以及由空气污染物和非适宜温度所导致的每日超额死亡风险。在研究期间, 272 个城市的平均 AHI 为 6。全国 36% 的日历日 AHI 不大

表1 我国272座城市2013—2015年大气环境与健康数据描述

Variables	Mean	SD	Minimum	P25	Median	P75	Maximum
Number of daily non-accidental deaths							
Total	16	16	3	7	12	20	165
CVD	8	7	1	3	6	10	65
CHD	3	3	0	1	2	3	28
Stroke	4	4	0	2	3	5	33
Respiratory disease	2	3	0	1	1	3	34
COPD	2	2	0	0	1	2	29
Air pollutants							
PM <sub>2.5</sub> (μg·m <sup>-3</sup> )	56	20	18	41	54	67	127
NO <sub>2</sub> (μg·m <sup>-3</sup> )	31	11	10	22	30	38	66
O <sub>3</sub> (μg·m <sup>-3</sup> )	77	14	36	68	77	87	113
Weather							
Mean temperature (°C)	15	5	-0.5	12	16	18	25
Relative humidity (%)	68	10	35	61	71	77	91

SD: standard deviation; P25: the 25th percentile; P75: the 75th percentile.

表2 我国272座城市2013—2015年疾病别AHI公式中各个危险因素的系数

Diseases	<i>c</i> value	Coefficients for each pollutant and temperature			
		PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	Temperature
Warm period					
CVD	24.30	0.000175	0.000511	0.000206	0.0321
CHD	21.60	0.000138	0.000705	0.000205	0.0295
Stroke	25.60	0.000258	0.000362	0.000172	0.0336
Respiratory disease	38.80	0.000264	0.000834	0.000110	0.0416
COPD	32.00	0.000397	0.001110	0.000140	0.0317
Total	18.00	0.000171	0.000498	0.000090	0.0239
Cold period					
CVD	91.10	0.000248	0.000858	0.000240	0.0270
CHD	100.00	0.000277	0.000779	0.000217	0.0275
Stroke	82.10	0.000178	0.000743	0.000194	0.0256
Respiratory disease	53.50	0.000368	0.000953	0.000440	0.0185
COPD	57.30	0.000480	0.001170	0.000539	0.0187
Total	66.10	0.000212	0.000724	0.000214	0.0214

The *c* value is the scaling factor that denotes the maximum weighted average of excess deaths per 100 people in the 272 cities. “Warm” is defined as a temperature above the minimum mortality temperature; “cold” is defined as a temperature below the minimum mortality temperature; and “coefficient” refers to the total and specific mortality change associated with a unit change in temperature and air pollutants. All AHIs were calculated based on the temperature at lag 0–21 day, PM<sub>2.5</sub> at lag 0 day, NO<sub>2</sub> at lag 0 day, and O<sub>3</sub> at lag 2 day.

于3、21%为4~5、24%为6~8、20%大于8。与大气污染和非适宜温度相关的每日平均超额死亡率百分比为28.23%，其中PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>和非适宜温度分别占1.12%、2.29%、1.35%和23.47% [由公式(3)计算]。

表3 关于AHI和空气污染物和非适宜温度造成的每日超额死亡风险的描述性统计

Parameters	Mean	SD	Minimum	P25	Median	P75	Maximum
AHI	6	4	0	3	5	8	26
ER							
Total (%)	28.23	24.81	1.03	10.48	18.57	39.87	172.80
PM <sub>2.5</sub> (%)	1.12	0.79	0.09	0.56	0.90	1.43	9.01
O <sub>3</sub> (%)	1.35	0.75	0.08	0.79	1.19	1.77	5.36
NO <sub>2</sub> (%)	2.29	1.33	0.15	1.30	1.99	3.01	10.47
Temperature (%)	23.47	24.15	0	6.25	14.46	34.41	167.59

### 3.2. AHI的预测能力

如表4所示，AHI与当天的全死因死亡率和死因别死亡率显著相关。“总AHI”每增加一个单位，每日全死因死亡率增加0.84% [95%置信区间 (CI): 0.62%, 1.07%]、总心血管疾病死亡率增加1.01% (95% CI: 0.72%, 1.30%)、冠心病死亡率增加0.98% (95% CI: 0.57%, 1.40%)、卒中死亡率增加1.02% (95% CI: 0.65%, 1.39%)、总呼吸系统疾病死亡率增加1.66% (95% CI: 1.18%, 2.15%)、慢性阻塞性肺病死亡率增加1.71% (95% CI: 1.15%, 2.27%)。如图1所示，在全国范围内“总AHI”与全死因死亡率和各疾病别死亡率的暴露反应关系曲线几乎是线性的，没有阈值。“总AHI”与“特异性AHI”所获得的疾病别死亡率的回归系数估计值和模型拟合优度指标 (*R*<sup>2</sup>和AIC) 非常相似 (表4)。将AHI的范围调整到0~500后，发现AHI<sub>0-500</sub>每增加50个单位，总死亡率、心血管疾病、冠心病、卒中、呼吸系统疾病和慢性阻塞性肺病死亡率分别增加0.91%、1.13%、1.18%、1.07%、1.79%和1.84% (见

附录A中的表S1)。这些估计值与“总AHI”(0~10)每增加一个单位的估计值相当。

通过改变日历日的自然三次样条平滑函数中的自由度进行灵敏度分析,得到的结果基本可以与主要模型结果进行比较(数据未提供)。附录A中的表S2和表S3显示了PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>和CO的回归系数和每日超额死亡风险,额外纳入PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>和CO后重新构建AHI,其分布与主要结果相似(见附录A中的表S2~S4)。

## 4. 讨论

在本文的多城市研究中,基于全国272座城市的数据,为环境空气污染和非适宜温度构建了一个新的AHI。这一新指数首次将空气污染和温度结合起来构建了一个基于健康的暴露指数。结果表明,该AHI在预测全死因死亡率和疾病别死亡率方面表现良好。总的来说,这个全国AHI有可能成为向公众进行空气污染和温度相关健康风险

交流的有效工具。

### 4.1. AHI的构建

目前的AQI仅由AQI最高的空气污染物决定,与之不同的是,新的AHI考虑了主要空气污染物和温度对健康的综合影响。在另一项研究中,Hu等[16]在系统回顾中国相关研究的基础上,通过估算PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>与每日死亡率的暴露反应关系,构建了基于健康风险的空气质量指数(HAQI)[17]。研究者发现,当多种空气污染物同时处于高水平时,HAQI值高于当前的AQI值,表明在高暴露情景下,AQI可能无法捕捉多种污染物的综合效应。除了空气污染外,在AHI中还引入了非适宜温度以综合评估这些主要大气环境风险因素的整体健康风险,从而更好地向公众进行风险交流。

选择合适的危险因素是建立AHI的重要步骤。与HAQI相似的是,AHI的公式是根据所包含的空气污染物来确定的。因此,AHI公式具有一定的灵活性,允许研究

表4 比较我国272座城市2013—2015年“特异性AHI”和“总AHI”与每日死因别死亡率的关系

Diseases	Total AHI (%)			Specific AHI (%)		
	Estimates (95% CI)	R <sup>2</sup>	AIC	Estimates (95% CI)	R <sup>2</sup>	AIC
CVD	1.01 (0.72, 1.30)	0.1405	1.4019	0.96 (0.67, 1.25)	0.1405	1.4019
CHD	0.98 (0.57, 1.40)	0.0847	1.2665	0.86 (0.44, 1.28)	0.0849	1.2661
Stroke	1.02 (0.65, 1.39)	0.0867	1.2978	0.92 (0.57, 1.28)	0.0865	1.2980
Respiratory disease	1.66 (1.18, 2.15)	0.0960	1.2135	1.66 (1.19, 2.13)	0.0959	1.2136
COPD	1.71 (1.15, 2.27)	0.0833	1.1508	1.75 (1.19, 2.31)	0.0832	1.1511
Total	0.84 (0.62, 1.07)	0.1646	1.5648			

CI: confidence interval. Estimates are presented as percentage changes and 95% CI associated per unit increase in indices.

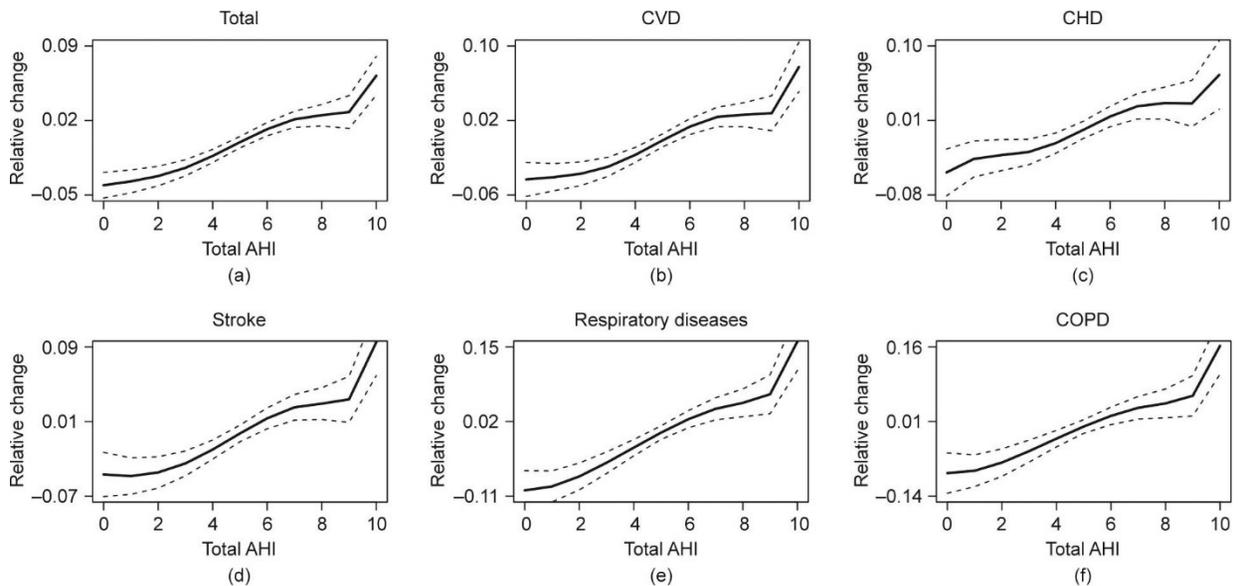


图1. 我国272个城市2013—2015年AHI与每日总死亡率、心血管疾病、冠心病、卒中和呼吸系统疾病以及慢性阻塞性肺疾病死亡率的暴露反应曲线。y轴表示AHI对死亡率相对变化的影响。实线表示平均估计值,虚线表示95%置信区间。

人员纳入任何感兴趣的空气污染物。从以往经验来看,将所有空气污染物的超额健康风险全部合并在一起效果并不理想,因为这样做可能导致多重共线性和过拟合的问题[18]。在本研究中,未纳入 $PM_{10}$ 、CO和 $SO_2$ ,原因如下:① $PM_{10}$ 的效应很大程度上可归因于 $PM_{2.5}$ ;②在之前发表的研究中使用相同的数据集进行分析,发现在调整了其他空气污染物后 $SO_2$ 的效应大大减弱[19];③每日CO浓度的年平均值为 $1.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,远低于我国空气质量标准( $4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )。在构建AHI时,最终选择 $PM_{2.5}$ 、 $NO_2$ 和 $O_3$ 作为空气质量指标,因为这些污染物能代表特定的来源,而且与每日死亡率的关联独立于其他大气污染物[8,10,13]。

#### 4.2. AHI的有效性

本研究评估了新的AHI在预测全因死亡率和疾病别死亡率方面的表现。结果显示“总AHI”和全死因死亡率之间几乎是线性相关的,没有阈值。这些结果表明AHI在预测每日总死亡风险方面表现良好。此外,在研究与疾病别死亡率之间的关系方面,使用“总AHI”与“特异性AHI”得到了相似的估计值,“总AHI”与“特异性AHI”在模型拟合优度方面的表现也较相似。这些发现表明“总AHI”可能足以预测与空气污染和温度相关的疾病别死亡率。虽然当所关注的健康结局不是全因死亡率时,对不同

疾病别死亡率单独构建AHI可能得到的效应值更准确,但在向公众进行健康风险交流方面,使用“总AHI”来估计全死因和疾病别死亡率可能更加方便实用。

#### 4.3. 风险交流

本研究提出的AHI是一个全面的健康风险交流工具,可用于告知公众并促使他们采取措施,以减少短期暴露于环境空气污染和非适宜温度对健康造成的有害影响。此外,该指数不仅表征了同时暴露于多种大气环境危险因素的总体风险,而且还提供了每一种危险因素单独暴露的健康风险。因此,AHI有助于识别主要的危险因素,引导公众采取最有效的保护措施。例如,当 $PM_{2.5}$ 是主要危险因素时,人们可以减少户外活动的的时间和强度、待在室内、关闭窗户、使用空气净化器。当极端温度是主要风险因素时,人们可考虑待在有空调和(或)适当通风的室内。为了更好地从健康保护的角度对该指标进行总结和解释,表5列出了不同AHI水平对应的健康风险等级、潜在的有害健康影响以及建议的缓解措施。AHI也可以作为现有AQI的补充,并作为向易感人群进行风险沟通的工具,具有公共卫生意义。按照本研究提供的方法,决策者可以根据当地的环境条件和人口特征因地制宜的建立当地的AHI。

表5 AHI的风险交流

AHI	Colors	Levels	Health implications	Cautionary statements
0-1	Green	Good	Air quality and temperature are satisfactory, and air pollution and temperature pose little or no risk	None
2-3	Yellow	Moderate	Air quality and temperature are acceptable; however, for some pollutants or temperature, there may be a moderate health concern for a very small number of people who are unusually sensitive to air pollution or temperature	People with severe diseases should limit prolonged outdoor exertion
4-5	Orange	Unhealthy for sensitive groups	Members of sensitive groups may experience health effects. The general public is not likely to be affected	Active children and adults, and people with respiratory or CVDs, should limit prolonged outdoor exertion
6-7	Red	Unhealthy	Some members of the general public may experience health effects; members of sensitive groups may experience more serious health effects	<b>Common protective measures:</b> Active children and adults, and people with respiratory or CVDs, should avoid prolonged outdoor exertion and stay indoors with the doors and windows closed; everyone else, especially children, should limit prolonged outdoor exertion <b>Specific adaptive measures:</b> If air pollutants are the dominant risk factors, the above sensitive groups may take personalized protective measures (e.g., wearing a mask or respirator, using a home air purifier, and taking fish oil); if temperature is the dominant risk factor, the above sensitive groups may take precautions to maintain suitable temperature conditions (e.g., using an air conditioner and dressing appropriately according to the weather conditions)

续表

AHI	Colors	Levels	Health implications	Cautionary statements
8–9	Purple	Very unhealthy	Health warnings of emergency conditions. The entire population is likely to be affected	<b>Common protective measures:</b> Active children and adults, and people with respiratory or CVDs, should avoid all outdoor exertion and stay indoors with the doors and windows closed; everyone else, especially children, should limit outdoor exertion <b>Specific adaptive measures:</b> If air pollutants are the dominant risk factors, everyone may take personalized protective measures (e.g., wearing a mask or respirator, using a home air purifier, and taking fish oil); if temperature is the dominant risk factor, everyone may take precautions to maintain suitable temperature conditions (e.g., using an air conditioner and dressing appropriately according to the weather conditions)
10+	Maroon	Hazardous	Health alert: Everyone may experience more serious health effects	<b>Common protective measures:</b> Everyone should avoid all outdoor exertion and stay indoors with the doors and windows closed <b>Specific adaptive measures:</b> If air pollutants are the dominant risk factors, everyone should take personalized protective measures (e.g., wearing a mask or respirator, using a home air purifier, and taking fish oil); if temperature is the dominant risk factor, everyone should take precautions to maintain suitable temperature conditions (e.g., using an air conditioner and dressing appropriately according to the weather conditions)

Note: Air pollutants are defined as the dominant risk factors if their excess health risks on a particular day are higher than the excess risks of temperature. Temperature is defined as the dominant risk factor if its excess health risk is higher than the excess risks of air pollutants.

#### 4.4. 优势和局限性

本研究有以下几个优点。首先，使用大型多城市数据集构建了一个全国 AHI，因此，研究结果具有全国代表性。其次，与其他指标相比，AHI 将非适宜温度和空气污染综合在一起，能够更好地反映现实生活中的实际暴露情景，得到更全面的风险评估。最后，AHI 不仅可以提供同时暴露于多种危险因素的整体健康风险，还可以提供每个因素单独的超额死亡风险，从而更好地告知公众，促使公众寻求有针对性的防护措施。

本研究也有一定的局限性。首先，暴露数据（空气污染物和温度）来源于各个城市的固定监测站而非个体暴露，因此暴露错分是不可避免的。其次，受到发病数据可获得性的限制，本文只将最严重的健康事件（即死亡率）作为结局，没有考虑发病率。因此，目前的 AHI 可能无法捕捉到急性和相对较弱的健康影响。最后，该指数使用当地的暴露反应曲线进行构建，因此 AHI 的预测能力也与当地特征有关。在像整个国家这样的大区域，预测能力不如在大气和人口特征更为均质的小区域稳定。此外，受到数据可获得性的限制，无法在本研究中纳入近几年的数据来验证 AHI 的预测能力。

## 5. 结论

本研究基于 2013—2015 年我国 272 个城市中 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和温度与每日总死亡率的关系，构建了新的 AHI。“总 AHI”与全死因死亡率和疾病别死亡率显著相关。AHI 和死亡率之间的暴露反应曲线近似线性，没有阈值。该指数为向公众传达暴露于不同大气危险因素相关的健康风险提供了一个灵活而有前途的工具。

## 致谢

本研究由国家自然科学基金项目(92043301、82030103、91843302)和上海市气象局研究项目(ZD201904)资助。

## Compliance with ethics guidelines

Qingli Zhang, Renjie Chen, Guanjin Yin, Xihao Du, Xia Meng, Yang Qiu, Haidong Kan, and Maigeng Zhou declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.05.006>.

## References

- [1] Liu C, Chen R, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Tong S, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *N Engl J Med* 2019; 381(8):705–15.
- [2] Chen R, Yin P, Wang L, Liu C, Niu Y, Wang W, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities. *BMJ* 2018;363:k4306.
- [3] Murray CJL, Aravkin AY, Zheng P, Abbafati C, Abbas KM, Abbasi-Kangevari M, et al.; GBD 2019 Risk Factors Collaborators. 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(10258):1223–49.
- [4] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21987–2008: Grades of cold wave. Chinese standard. Beijing: Standards Press of China; 2008. Chinese.
- [5] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 29457–2012: Grade of the heat wave 2012. Chinese Standard. Beijing: Standards Press of China; 2013. Chinese.
- [6] Wilker EH, Yeh G, Wellenius GA, Davis RB, Phillips RS, Mittleman MA. Ambient temperature and biomarkers of heart failure: a repeated measures analysis. *Environ Health Perspect* 2012;120(8):1083–7.
- [7] Xu H, Wang T, Liu S, Brook RD, Feng B, Zhao Q, et al. Extreme levels of air pollution associated with changes in biomarkers of atherosclerotic plaque vulnerability and thrombogenicity in healthy adults. *Circ Res* 2019;124(5): e30–43.
- [8] Chen R, Yin P, Meng X, Liu C, Wang L, Xu X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality. A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Am J Respir Crit Care Med* 2017;196(1):73–81.
- [9] Chen R, Yin P, Meng X, Wang L, Liu C, Niu Y, et al. Associations between coarse particulate matter air pollution and cause-specific mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Environ Health Perspect* 2019; 127(1):017008.
- [10] Yin P, Chen R, Wang L, Meng X, Liu C, Niu Y, et al. Ambient ozone pollution and daily mortality: a nationwide study in 272 Chinese cities. *Environ Health Perspect* 2017;125(11):117006.
- [11] Liu S, Wu X, Lopez AD, Wang L, Cai Y, Page A, et al. An integrated national mortality surveillance system for death registration and mortality surveillance, China. *Bull World Health Organ* 2016;94(1):46–57.
- [12] Zhou M, Wang H, Zhu J, Chen W, Wang L, Liu S, et al. Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990–2013: a systematic subnational analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* 2016; 387(10015): 251–72.
- [13] Chen R, Yin P, Meng X, Wang L, Liu C, Niu Y, et al. Associations between ambient nitrogen dioxide and daily cause-specific mortality: evidence from 272 Chinese cities. *Epidemiology* 2018;29(4):482–9.
- [14] Du X, Chen R, Meng X, Liu C, Niu Y, Wang W, et al. The establishment of National Air Quality Health Index in China. *Environ Int* 2020;138:105594.
- [15] Samoli E, Analitis A, Touloumi G, Schwartz J, Anderson HR, Sunyer J, et al. Estimating the exposure-response relationships between particulate matter and mortality within the APHEA multicity project. *Environ Health Perspect* 2005; 113(1):88–95.
- [16] Hu J, Ying Q, Wang Y, Zhang H. Characterizing multi-pollutant air pollution in China: comparison of three air quality indices. *Environ Int* 2015;84:17–25.
- [17] Shang Y, Sun Z, Cao J, Wang X, Zhong L, Bi X, et al. Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality. *Environ Int* 2013;54:100–11.
- [18] Wang Y, Ying Q, Hu J, Zhang H. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013–2014. *Environ Int* 2014;73:413–22.
- [19] Wang L, Liu C, Meng X, Niu Y, Lin Z, Liu Y, et al. Associations between short-term exposure to ambient sulfur dioxide and increased cause-specific mortality in 272 Chinese cities. *Environ Int* 2018;117:33–9.