

# 基于大气污染累积健康风险的天津市空气质量健康指数研究

倪洋<sup>1</sup>, 张继勉<sup>1</sup>, 白羽<sup>1,2</sup>, 曾强<sup>1,2</sup>

1. 天津市疾病预防控制中心职业健康研究所, 天津 300011  
2. 天津医科大学公共卫生学院, 天津 300070



DOI 10.11836/JEOM22061

## 摘要:

**[背景]** 累积风险指数(CRI)可综合考虑多种大气污染物对健康的联合作用,但目前罕见基于大气污染 CRI 构建空气质量健康指数(AQHI)的研究。

**[目的]** 基于大气污染物 CRI 构建天津市 AQHI 并对其有效性进行验证。

**[方法]** 收集天津市 2015—2019 年每日大气污染、气象因素、非意外死亡数据,并建立时间序列数据库,采用描述性统计分析方法对数据的基本分布特征进行分析。采用广义相加模型的单污染物模型和双污染物模型建立大气污染物与非意外死亡的暴露反应关系,筛选最佳滞后天数和指示污染物,然后采用多污染物模型计算大气污染的 CRI 值,并依据 CRI 值构建 AQHI 并分级。最后采用广义相加模型分别建立 AQHI 和空气质量指数(AQI)与非意外死亡的暴露反应关系,并对暴露反应关系系数进行比较,以广义交叉验证(GCV)值和模型的  $R^2$  对 AQHI 的有效性进行验证。

**[结果]** 本研究选择 lag1 为最佳滞后天数,在综合考虑超标情况和统计学模型结果的基础上,选择  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  作为最终的指示污染物。4 种指示污染物的浓度每升高  $1 \mu g \cdot m^{-3}$  对非意外死亡影响的效应值  $b$ ,分别为-0.000 02、0.000 79、0.000 15 和 0.000 42。基于上述系数计算 CRI,并构建 AQHI。按照分级标准提示,63%的时间是处于低风险级别,有 34%的时间处于中风险级别。分别建立了 AQHI 和 AQI 与全人群、女性人群和男性人群非意外死亡的暴露反应关系,结果显示,AQHI 每增加一个四分位数间距(IQR),全人群、女性人群和男性人群非意外死亡的超额风险均高于 AQI 的相应指标值;且 AQHI 模型的 GCV 值(分别为 2.694、1.819、1.938)均低于 AQI 模型的 GCV 值(分别为 2.747、1.850、1.961),AQHI 模型的  $R^2$  值(分别为 0.849、0.780、0.820)均高于 AQI 模型的  $R^2$  值(分别为 0.846、0.776、0.817)。

**[结论]** 与 AQI 相比,基于大气污染物的 CRI 构建的 AQHI 能够较好地预测天津市空气污染对人群的健康风险。

**关键词:** 大气污染;累积风险指数;空气质量健康指数;天津市

**Establishment of air quality health index based on cumulative health risk of air pollution in Tianjin** NI Yang<sup>1</sup>, ZHANG Jimian<sup>1</sup>, BAI Yu<sup>1,2</sup>, ZENG Qiang<sup>1,2</sup> (1. Institute for Occupational Health, Tianjin Centers for Disease Control and Prevention, Tianjin 300011, China; 2. School of Public Health, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China)

## Abstract:

**[Background]** Cumulative risk index (CRI), as a commonly used approach to estimate the joint effects of multiple air pollutants on health, has been used by few studies to construct an air quality health index (AQHI).

**[Objective]** To construct an AQHI based on the CRI of air pollution in Tianjin and evaluate the validity of the AQHI.

**[Methods]** Daily data on air pollutants, meteorological factors, and non-accidental deaths during 2015–2019 in Tianjin were collected to create a time-series object. Descriptive statistical analyses were used to describe the characteristics of the data. To determine the best lag day and indicative pollutant, single-pollutant and two-pollutant generalized additive models were fitted to construct the exposure-response relationships between air pollutants and non-accidental deaths. After that we evaluated a CRI of air pollution using multi-pollutant models and constructed an AQHI and its classifications based on the CRI. Finally, we compared the exposure-response associations

## 基金项目

国家自然科学基金项目(81872590);天津市卫生健康科技项目青年人才项目(TJWJ2021QN030);天津市医学重点学科(专科)建设项目(TJYXZDXK-066B)

## 作者简介

倪洋(1989—),女,硕士,主管医师;  
E-mail: niyang6@tj.gov.cn

## 通信作者

曾强, E-mail: zengqiang6@tj.gov.cn

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2022-02-23

录用日期 2022-10-08

文章编号 2095-9982(2022)11-1242-07

中图分类号 R12

文献标志码 A

## 引用

倪洋,张继勉,白羽,等.基于大气污染累积健康风险的天津市空气质量健康指数研究[J].环境与职业医学,2022,39(11):1242-1248.

## 本文链接

[www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM22061](http://www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM22061)

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

ZENG Qiang, E-mail: zengqiang6@tj.gov.cn

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2022-02-23

Accepted 2022-10-08

## To cite

NI Yang, ZHANG Jimian, BAI Yu, et al. Establishment of air quality health index based on cumulative health risk of air pollution in Tianjin [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(11): 1242-1248.

## Link to this article

[www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM22061](http://www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM22061)

and coefficients of the AQHI and the conventional air quality index (AQI) with non-accidental deaths, and evaluated the health risk communication validity of the AQHI using generalized cross validation (GCV) values and  $R^2$  values.

**[Results]** We selected lag1 as the best lag day and  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  and  $O_3$  as the appropriate pollutants according to the unqualified rates of pollutants and significant statistical results. One  $\mu g \cdot m^{-3}$  increase of  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , and  $O_3$  was associated with  $-0.00002$ ,  $0.00079$ ,  $0.00015$ , and  $0.00042$  increase in effect size  $b$  of the non-accidental mortality, respectively. Based on these coefficients, we calculated the CRI and AQHI. According to a pre-determined classification scheme of the AQHI, the air quality of 63% study days was low risks and that of 34% study days was median risks. The associations of AQHI and AQI with non-accidental deaths in different populations were evaluated. The results showed that the excess risks of non-accidental deaths in total, female, and male populations for per interquartile range (IQR) increase in AQHI were higher than the corresponding values of AQI. The GCV values of the AQHI model (2.694, 1.819, and 1.938, respectively) were lower than those of the AQI model (2.747, 1.850, and 1.961, respectively), and the  $R^2$  values of the AQHI model (0.849, 0.780, and 0.820, respectively) were higher than those of the AQI model (0.846, 0.776, and 0.817, respectively).

**[Conclusion]** Compared with AQI, the CRI-based AQHI may communicate the air pollution-related health risk to the public more effectively in Tianjin.

**Keywords:** air pollution; cumulative risk index; air quality health index; Tianjin

全球疾病负担研究显示,2017年大气污染可导致全球195个国家和地区约490万人早死和约1.47亿年的伤残调整寿命年损失<sup>[1]</sup>,可见大气污染已成为全世界所面临的主要环境问题,并造成了严重的疾病负担。那么如何全面、准确和直观地向公众展示大气质量及其对人群的健康风险,一直是环境卫生领域的重点和难点问题之一。目前,我国及全球多个国家均采用空气质量指数(air quality index, AQI)向公众提示大气质量及其健康风险,但该指数仅考虑了某日首要污染物的单独作用,而忽略了多种大气污染物的累积和联合作用,因此可能在一定程度上低估了大气污染的健康风险<sup>[2-3]</sup>。为综合评估大气污染的健康风险,加拿大首次提出空气质量健康指数(air quality health index, AQHI)<sup>[4]</sup>,随后多个国家和我国多个地区的研究也开始尝试建立AQHI<sup>[5-8]</sup>。该指数是通过叠加多种不同污染物在单污染物模型下对人群健康的超额风险(excess risk, ER)值再除以最大ER值所得<sup>[4]</sup>。但由于多种大气污染物之间存在明显的相关关系,因此该种AQHI的计算方式可能会导致健康风险的高估<sup>[9]</sup>。除该种计算方式外,以往有一些研究也曾尝试采用其他计算方式例如主成分分析法、累积风险指数(cumulative risk index, CRI)等方法来分析多种污染物之间的相关性和联合作用,以期构建更为准确的AQHI<sup>[10-12]</sup>。Cao等<sup>[11]</sup>在我国宁波的研究采用传统方法、主成分分析法和CRI法三种方法分别构建了AQHI,结果提示,与其他方法构建的AQHI相比,基于CRI构建的AQHI对健康风险的预测能力更准确。但目前除该研究外,未见我国其他地区的研究采用CRI法构建AQHI,且由于大气污染对人群的健康风险存在地域差异,因此本研究选取天津市这一北方典型城市作为研究地点,以大气污染

对人群健康的CRI为基础构建了AQHI并进行验证,以期选择更为全面、科学、准确的指数,直观地向公众展示大气质量及其对人群的健康风险,并最终降低大气污染的疾病负担提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料来源

**1.1.1 大气污染物数据** 本研究选择天津市中心城区作为研究现场,包括河东区、河北区、河西区、南开区、和平区和红桥区六个城区。大气污染物数据来源于天津市环境监测中心,收集2015年1月1日至2019年12月31日大气污染物(包括 $PM_{2.5}$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 和 $O_3$ 四种污染物)的日均浓度数据和每日AQI。

**1.1.2 气象数据** 气象数据来源于天津市气象局。收集2015年1月1日至2019年12月31日气象指标(包括温度和相对湿度)的日均数据。

**1.1.3 死亡数据** 死亡统计数据来源于天津市疾病预防控制中心死因登记报告信息系统,本研究按照死亡日期以及《疾病和有关健康问题的国际统计分类第十版(The International Statistical Classification of Disease and Related Health Problems 10th Revision, ICD-10)》中规定的死因编码,收集和汇总天津市六城区非意外死亡(A00-R99)的日死亡数据。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 描述性统计分析** 建立2015—2019年每日大气污染物、气象因素、死亡数据的时间序列数据库。采用描述性统计分析方法对数据进行分析,采用Spearman相关分析对各大气污染物之间的相关性进行分析。

**1.2.2 CRI的计算** CRI最初是由Lippmann<sup>[13]</sup>提出的,

其代表的是与任何污染物的浓度均不变时相比,多种污染物的浓度每增加一个单位时对健康的相对危险度。基于此,本研究采用多污染物广义相加模型来获取多种污染物对非意外死亡的效应值  $b$ 。具体计算过程为:首先,利用单污染物广义相加模型<sup>[14]</sup>,建立各大气污染物不同滞后天数(lag0~lag3)与非意外死亡的暴露反应关系,筛选效应值  $b$  最大的滞后天数作为最佳滞后天数进行后续分析。然后利用双污染物广义相加模型,在最佳滞后天数下,建立污染物与非意外死亡的暴露反应关系,如果某种污染物对非意外死亡的效应值  $b$  在单污染物模型和双污染物模型下均具有统计学意义,则选择该污染物作为建立 CRI 的指示污染物<sup>[15]</sup>。最后利用多污染物广义相加模型,建立指示污染物与非意外死亡的暴露反应关系,获取指示污染物与非意外死亡之间的暴露反应关系系数,利用公式(1)计算 CRI<sup>[11]</sup>。

$$I_{CRI_t} = \exp\left(\sum b_p x_{pt}\right) \quad (1)$$

其中,  $I_{CRI_t}$  为观察日  $t$  多种指示污染物对非意外死亡的累积风险指数;  $P$  为某种指示污染物;  $b_p$  为某种指示污染物与非意外死亡在广义相加多污染物模型中的暴露反应关系系数,  $x_{pt}$  为某种指示污染物在观察日  $t$  的日均浓度。

**1.2.3 AQHI 的构建** 首先,利用公式(2)计算指示污染物在观察日  $t$  的超额死亡率  $R_{ER_t}$ <sup>[11]</sup>。

$$R_{ER_t} = 100 \times (I_{CRI_t} - 1) \quad (2)$$

然后,根据每日的超额死亡率,利用公式(3)计算得到在观察日  $t$  的  $I_{AQHI_t}$ <sup>[11]</sup>。

$$I_{AQHI_t} = (R_{ER_t} / \max_{t=1,2,\dots,n} \{R_{ER_t}\}) \times 10 \quad (3)$$

**1.2.4 AQHI 和 AQI 的分级** 参考以往文献的分级标准,将 AQHI 分为 4 个等级,其中 0~3 为低风险等级,4~6 为中风险等级,7~10 为高风险等级,10 以上为极高风险等级<sup>[4,11,16]</sup>。将 AQI 也分为 4 个等级,其中 1~100 为低风险等级,101~200 为中风险等级,201~300 为高风险等级,300+以上为极高风险等级<sup>[12]</sup>。

**1.2.5 AQHI 和 AQI 预测效果比较** 采用广义相加模型分别建立 AQHI 和 AQI 与全人群、男性人群和女性人群非意外死亡的暴露反应关系。通过比较 AQHI 和 AQI 每变化一个四分位数间距(interquartile range, IQR) 对非意外死亡的 ER(95%CI) 变化值以及模型的决定系数( $R^2$ )和广义交叉验证(generalized cross validation, GCV)值,模型的  $R^2$  值越大, GCV 值越小,说明模型的

拟合度越好,预测能力也越好<sup>[11,15,17]</sup>。

本研究的所有统计分析均采用 R 3.1.0 完成,  $P < 0.05$  时差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 描述性分析结果

2015—2019 年 5 年间,天津市六城区共有非意外死亡 281 131 人,日均死亡人数为 154 人,其中男性非意外死亡 155 843 人,女性非意外死亡 125 288 人。研究期间,  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  的日均浓度分别为  $61.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $18.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $44.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $114.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; AQI 的日均值为 93.8; 日均温度为  $13.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 日均相对湿度为 55.2%(表 1)。

表 1 天津市 2015—2019 年日非意外死亡数、日均温度和相对湿度以及大气污染物日均浓度的分布特征

Table 1 Distribution characteristics of daily averages of non-accidental death counts, temperature, relative humidity, and air pollutant concentrations in Tianjin, China, 2015–2019

变量 (Variable)	均数±标准差 (Mean±SD)	最小值 (Minimum)	中位数 (Median)	最大值 (Maximum)	四分位数 间距(IQR)
每日非意外死亡人数(Daily non-accidental death counts)					
合计(Total)	154.0 ± 52.1	2.0	132.0	312.0	85.0
男性(Male)	85.3 ± 30.1	1.0	74.0	180.0	49.0
女性(Female)	68.6 ± 23.6	1.0	62.0	151.0	36.0
日均温度/ $^\circ\text{C}$ (Daily average temperature/ $^\circ\text{C}$ )					
	13.9 ± 11.3	-16.0	15.7	34.0	21.0
日均相对湿度/% (Daily average relative humidity/%)					
	55.2 ± 19.1	12.0	55.0	100.0	30.0
$PM_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	61.5 ± 48.3	6.0	47.9	367.5	47.1
$SO_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	18.3 ± 19.2	2.0	12.6	216.4	13.8
$NO_2/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	44.6 ± 21.8	8.1	39.5	167.6	28.4
$O_3/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	114.5 ± 65.9	2.7	102.1	348.7	96.4
AQI	93.8 ± 55.7	17.0	80.0	437.0	54.0

采用 Spearman 相关分析对各污染物之间的相关关系进行分析,结果发现,  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$  和  $NO_2$  三个污染物之间呈正相关关系( $P < 0.01$ ),  $O_3$  与其他三个污染物之间呈负相关关系( $P < 0.01$ )(表 2)。

表 2 天津市 2015—2019 年各大气污染物之间的相关关系( $r_s$ )  
Table 2 Spearman correlation coefficients for included air pollutants in Tianjin, China, 2015–2019 ( $r_s$ )

变量(Variable)	$PM_{2.5}$	$SO_2$	$NO_2$	$O_3$
$PM_{2.5}$	1.0000			
$SO_2$	0.5632*	1.0000		
$NO_2$	0.5835*	0.7030*	1.0000	
$O_3$	-0.0680*	-0.3526*	-0.4482*	1.0000

[注(Note)] \*:  $P < 0.01$ 。

## 2.2 AQHI 的构建和分级

**2.2.1 最佳滞后天数的选择** 采用单污染物模型对天津市 2015—2019 年各大气污染物在 lag0~lag3 对非意外死亡影响进行分析,发现 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 对非意外死亡的影响效应值 *b* 均在 lag1 时达到最大(图 1)。因此选择 lag1 作为最佳滞后天数进行后续的分析。

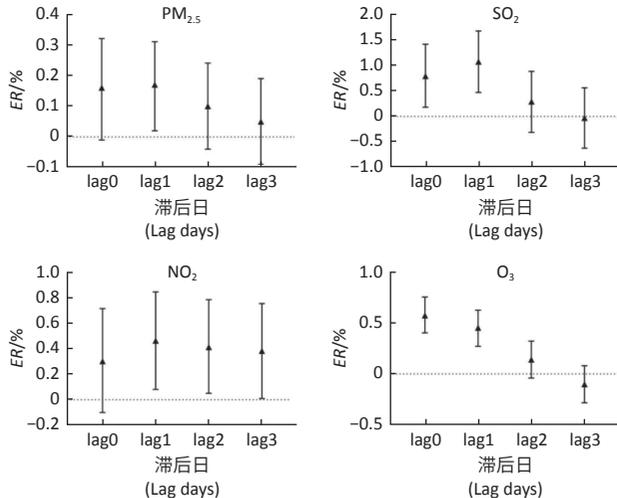


图 1 天津市 2015—2019 年各大气污染物不同滞后日的日均浓度每升高 10 µg·m<sup>-3</sup> 对非意外死亡影响的单污染物模型效应图

Figure 1 Percent changes of excess risk in non-accidental deaths for a 10 µg·m<sup>-3</sup> increase in daily average air pollutant concentrations at different lag days in single-pollutant models in Tianjin, China, 2015–2019

**2.2.2 指示污染物的选择** 为筛选构建 AQHI 的指示污染物,采用双污染物模型对不同污染物在 lag1 对非意外死亡的影响进行分析。PM<sub>2.5</sub> 在纳入其他污染物后,对非意外死亡的影响不再具有统计学意义;SO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 在纳入其他污染物后,对非意外死亡的影响仍具有统计学意义;虽然 NO<sub>2</sub> 在纳入 PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub> 后,对非意外死亡的影响不再具有统计学意义,但纳入 O<sub>3</sub> 后,对非意外死亡的影响仍具有统计学意义(图 2)。但研究期间,PM<sub>2.5</sub> 的日均浓度超标率较高,超过 GB3095—2012《环境空气质量标准》一级和二级浓度限值(35 µg·m<sup>-3</sup> 和 75 µg·m<sup>-3</sup>)的率分别为 68.7%和 31.3%,因此在综合考虑污染物的超标情况和以往文献针对指示污染物的选择基础上,本研究选择 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 作为最终的指示污染物,纳入多污染物模型进行 CRI 的计算和 AQHI 的构建<sup>[7,11,15]</sup>。

**2.2.3 基于 CRI 的 AQHI 的构建** 为计算指示污染物(PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub>)对非意外死亡的 CRI,将四种指示污染物同时纳入多污染模型,构建暴露反应关系,获取了暴露反应关系系数,即 4 种指示污染物的浓度每升高 1 µg·m<sup>-3</sup>对非意外死亡影响的效应值 *b*,分别为

-0.000 02、0.000 79、0.000 15 和 0.000 42。将暴露反应关系系数代入公式(1),计算得出了每日大气污染物对非意外死亡的 CRI。根据计算所得 CRI,计算了每日的 ER 值;最后根据 ER 值,构建了基于 CRI 的 AQHI。所构建的 AQHI 与 AQI 的相关系数分别为 *r*<sub>s</sub>=0.343 8 (*P*<0.001)。研究期间 ER 的最大值为 22.25, CRI 和 AQHI 的均值分别为 1.07 和 3.20(表 3)。

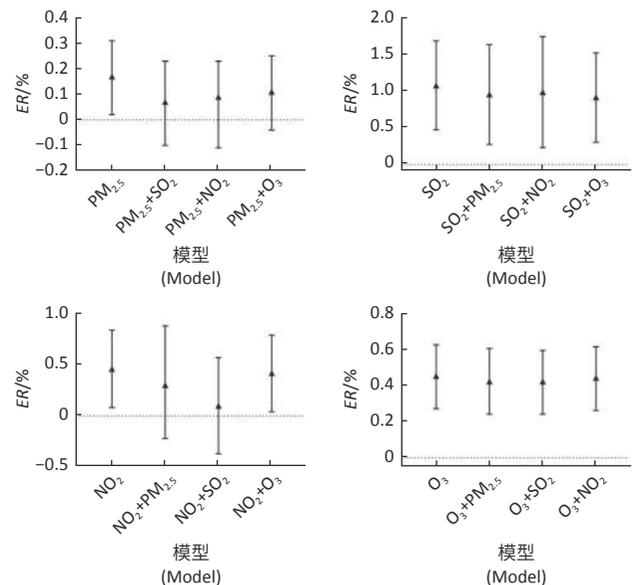


图 2 天津市 2015—2019 年各大气污染物在 lag1 天的日均浓度每升高 10 µg·m<sup>-3</sup> 对非意外死亡影响的双污染物模型效应图

Figure 2 Percent changes of excess risk in non-accidental deaths for a 10 µg·m<sup>-3</sup> increase in daily average air pollutant concentrations at lag 1 in two-pollutant models in Tianjin, China, 2015–2019

表 3 天津市 2015—2019 年大气污染物的 CRI 和 AQHI 的分布特征

Table 3 Distribution characteristics of CRI and AQHI for included air pollutants in Tianjin, China, 2015–2019

变量名称 (Variable)	均数±标准差 (Mean±SD)	最小值 (Minimum)	中位数 (Median)	最大值 (Maximum)	四分位数间距 (IQR)
CRI	1.07±0.03	1.02	1.07	1.22	0.04
AQHI	3.20±1.29	0.79	3.04	10.00	1.86

**2.2.4 基于 CRI 的 AQHI 的分级** 按照 AQI 的分级标准,研究期间空气质量对人群健康影响有 68%的时间是处于低风险级别,26%的时间处于中风险级别;按照 AQHI 的分级标准对基于 CRI 构建的 AQHI 进行分级,结果提示,研究期间空气质量对人群健康的影响有 63%的时间是处于低风险级别,有 34%的时间处于中风险级别(图 3)。

## 2.3 AQHI 和 AQI 预测效果比较

为比较 AQHI 和 AQI 的预测效果,分别建立了

AQHI 和 AQI 与全人群、女性人群和男性人群非意外死亡的暴露反应关系(表 4), 结果发现, 无论全人群、女性人群和男性人群, AQHI 值每升高一个 *IQR*, 非意外死亡的超额风险均高于 AQI 的相应指标值, 同时 AQHI 对全人群、女性人群和男性人群非意外死亡的暴露反应关系均具有统计学意义; 而 AQI 值仅对全人群和女性人群非意外死亡的暴露反应关系具有统计学意义, 对男性人群的暴露反应关系不具有统计学意义。且 AQHI 模型的 GCV 值均低于 AQI 模型的 GCV 值, AQHI 模型的  $R^2$  值均高于 AQI 模型的  $R^2$  值。这说明与 AQI 相比, AQHI 模型对人群健康的预测效果较好。

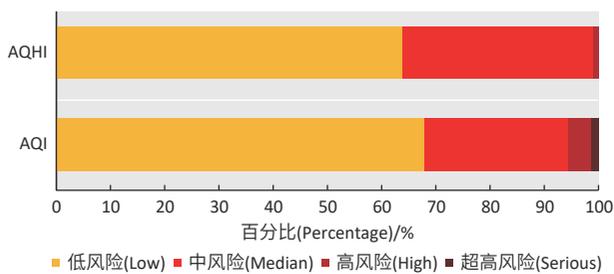


图 3 AQHI 和 AQI 的各风险等级比例分布图

Figure 3 The distribution of health risk percentages of AQHI and AQI

表 4 AQHI 和 AQI 对天津市全人群、女性人群和男性人群非意外死亡超额风险的预测比较

变量(Variable)	ER(95%CI)/%	P	GCV	$R^2$
<b>AQHI</b>				
全人群(All)	4.37(3.06~5.69)	<0.001	2.694	0.849
女性(Female)	5.10(3.47~6.75)	<0.001	1.819	0.780
男性(Male)	3.69(2.20~5.20)	<0.001	1.938	0.820
<b>AQI</b>				
全人群(All)	0.84(0.13~1.60)	0.021	2.747	0.846
女性(Female)	1.10(0.21~1.99)	0.015	1.850	0.776
男性(Male)	0.63(-0.20~1.46)	0.134	1.961	0.817

### 3 讨论

目前我国及世界上的多个地区和国家均采用 AQI 作为空气质量评价指标。该指标采用分段线性函数的计算方法, 以各污染物分指数最高值表示空气质量<sup>[18]</sup>, 因此该指标仅考虑首要污染物的污染程度, 未考虑到多种大气污染物对人群健康危害的联合作用, 因此可能在一定程度上低估大气污染的健康风险<sup>[2-3]</sup>。而 AQHI 作为一种新型的空气质量健康风险评价指标, 是通过评估各种大气污染物的超额死亡风险的暴露

反应关系, 从而进行指数的构建, 因此该指标可将多种大气污染与急性健康风险之间的线性无阈值关系进行综合, 与 AQI 相比更能综合评估大气污染对健康的影响<sup>[4]</sup>。本研究结果也发现与 AQI 相比, 无论全人群、女性人群和男性人群, AQHI 值每升高一个 *IQR*, 非意外死亡的超额风险均高于 AQI 的相应指标值, 且 AQHI 模型的 GCV 值均低于 AQI 模型的 GCV 值, AQHI 模型的  $R^2$  值均高于 AQI 模型的  $R^2$  值, 所以认为与 AQI 相比, 基于大气污染物的 CRI 构建的 AQHI 能够较好地预测空气污染对人群的健康风险, 这一结论与以往多个地区的研究相一致<sup>[6-7,11,14,18]</sup>。

由于与 AQI 相比, AQHI 最大的优势就是能够将多种大气污染与急性健康风险之间的线性无阈值关系进行综合, 因此在构建 AQHI 时, 如何将多种污染物与人群健康之间的效应值进行综合对 AQHI 的准确性有着极大的影响。以往大部分研究在构建 AQHI 时, 仅通过叠加多种不同污染物在单污染物模型下对人群健康的 ER 值再除以研究期间最大 ER 值所得<sup>[4,6-7,15,19]</sup>, 但由于多种大气污染物之间存在明显的相关关系, 部分大气污染物对健康的影响在调整了其他污染物后, 可能不再具有统计学意义, 因此该种 AQHI 的计算方式可能会导致健康风险的高估<sup>[9]</sup>。为解决这一问题, 本研究引入 CRI 指标, 该指标将多种污染物同时纳入多污染物模型中进行暴露反应关系的建立, 进而分析多种污染物对健康的累积和联合作用, 已被广泛地应用于多种大气污染物与人群健康影响的综合作用分析研究中<sup>[13,20]</sup>。

以往也有一些研究采用了主成分分析法来评估多种污染物对健康的联合效应, 进而构建 AQHI<sup>[10-11]</sup>。与 CRI 指标方法不同, 该种方法是以多种污染物的浓度为基础, 构建主成分, 进而分析主成分与健康的效应值, 而后构建 AQHI。该方法虽然可以在一定程度上控制多种污染物的相关性, 但其最主要的局限性在于构建的主成分对于模型的累积贡献率有时较低, 例如 Zeng 等<sup>[10]</sup>在天津的研究采用主成分分析的方法构建了 AQHI, 该研究最终选取了两个主成分进行 AQHI 的构建, 但两个主成分的累积贡献率仅为 70%, 这必然会导致空气质量信息在一定程度上的损失, 进而导致构建的 AQHI 对于空气质量对人群健康风险的低估。此外 Cao 等<sup>[11]</sup>在我国宁波的研究采用传统方法、主成分分析法和 CRI 法三种方法分别构建了 AQHI, 该研究结果提示, 与其他方法构建的 AQHI 相比, 基于 CRI 构建的 AQHI 对健康风险的预测能力更准确。因此本研

究以 CRI 指标为基础,进行了 AQHI 的构建,结果发现研究期间空气质量对人群健康的影响有 63%的时间是处于低风险级别,有 34%的时间处于中风险级别,与 AQI 分级标准相比,低风险级别有一定程度的下降。但从图 3 可以看出,本研究 AQHI 的高风险等级所占比例较低,未见超高风险等级。这主要是由于 AQHI 的构建是依据研究期间的每日 ER 值与研究期间的最大 ER,由于本研究在构建空气污染与人群健康的暴露反应关系时所使用的研究数据时段与 AQHI 构建所使用的研究数据时段相同,故导致研究期间未出现超高风险等级,因此后期还需要纳入其他研究时间的数据对 AQHI 的分级进行深入的验证;此外也可能是由于本研究在进行 AQHI 风险等级分级时,分级标准主要参考以往研究对于 AQHI 的分级标准<sup>[4,11,16]</sup>,但由于不同研究数据和结果的差异性,可能会导致 AQHI 风险等级在一定程度上的低估,特别是高风险等级,因此后续还需要对 AQHI 的分级标准深入研究,以确定更具有地区适应性的 AQHI 分级标准,保证 AQHI 分级的准确性和科学性。

由于 CRI 指标是将多种污染物同时带入多污染物模型中,评估多种污染物对人群健康效应的联合作用,因此选择何种污染物作为指示污染物,进行 CRI 的计算对于 AQHI 的准确构建具有重要意义。为保证 AQHI 构建的准确性,本研究首先采用单污染物模型对不同污染物的最佳滞后日进行了筛选,随后采用双污染物模型对最佳滞后日下最适应的指示污染物进行了筛选,同时在考虑统计学模型筛选的基础上,还综合考虑了研究期间污染物的日均浓度超标情况。由于研究期间 PM<sub>2.5</sub> 的日均浓度超标率较高,故本研究最终选择了 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 作为指示污染物,代入多污染物模型,进行 CRI 的计算和 AQHI 的构建。Cao 等<sup>[11]</sup>在宁波的研究也选择了 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 作为非意外死亡的指示污染物进行 AQHI 的构建,与本研究所筛选的指示污染物相一致。本研究存在一定的局限性:(1)在进行指示污染物筛选时,本研究仅以 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 四种污染物作为基础污染物纳入模型筛选,并未考虑到其他污染物如 CO、PM<sub>10</sub>、超细颗粒物对健康的影响及其与纳入的四种污染物之间的联合作用。(2)本研究仅以非意外死亡作为健康结局,未考虑其他健康结局如心血管疾病死亡、呼吸系统疾病死亡以及不同年龄人群死亡等。(3)由于数据的可及性问题,本研究在进行 AQHI 的预测能力对比时,仍采用 2015—2019 年的数据建立 AQHI 和 AQI 对非意

外死亡的暴露反应关系,但在对构建指标的预测能力进行比较时,本研究纳入了性别分层的非意外死亡数据,在一定程度上对比较结果进行了验证。在今后的研究中,还需纳入更多的污染物和健康结局,准确地评估多种污染物对多种健康结局的 CRI,进而构建多层次、多维度的 AQHI,同时采用多维度的数据对 AQHI 的预测能力进行验证。通过这些研究结果,更为直观地向公众展示大气质量及其对不同人群的健康风险,也可综合和全面地为不同人群的科学出行提供指导。

综上所述,虽然本研究存在一定的局限性,但结果提示,与 AQI 相比,基于大气污染物的 CRI 构建的 AQHI 能够较好地预测天津市空气污染对人群的健康风险。

#### 参考文献

- [1] GBD 2017 Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. *Lancet*, 2018, 392(10159): 1923-1994.
- [2] HU J, YING Q, WANG Y, et al. Characterizing multi-pollutant air pollution in China: Comparison of three air quality indices[J]. *Environ Int*, 2015, 84: 17-25.
- [3] QIAO X, JAFFE D, TANG Y, et al. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: are China's air quality standards sufficient yet?[J]. *Environ Monit Assess*, 2015, 187(5): 250.
- [4] STIEB DM, BURNETT RT, SMITH-DOIRON M, et al. A new multipollutant, no-threshold air quality health index based on short-term associations observed in daily time-series analyses[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2008, 58(3): 435-450.
- [5] CHEN L, VILLENEUVE, ROWE BH, et al. The Air Quality Health Index as a predictor of emergency department visits for ischemic stroke in Edmonton, Canada[J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2014, 24(4): 358-364.
- [6] CHEN R, WANG X, MENG X, et al. Communicating air pollution-related health risks to the public: an application of the Air Quality Health Index in Shanghai, China[J]. *Environ Int*, 2013, 51: 168-173.
- [7] DU X, CHEN R, MENG X, et al. The establishment of national air quality health index in China[J]. *Environ Int*, 2020, 138: 105594.
- [8] OLSTRUP H, JOHANSSON C, FORSBERG B, et al. A multi-pollutant air quality health index (AQHI) based on short-term respiratory effects in Stockholm, Sweden[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(1): 105.
- [9] ROBERTS S. A new model for investigating the mortality effects of multiple air pollutants in air pollution mortality time-series studies[J]. *J Toxicol Environ Health Part A*, 2006, 69(6): 417-435.
- [10] ZENG Q, FAN L, NI Y, et al. Construction of AQHI based on the exposure relationship between air pollution and YLL in northern China[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 710: 136264.
- [11] CAO R, WANG Y, HUANG J, et al. The construction of the air quality health index (AQHI) and a validity comparison based on three different methods

- [J]. *Environ Res*, 2021, 197: 110987.
- [12] XU H, ZENG W, GUO B, et al. Improved risk communications with a Bayesian multipollutant Air Quality Health Index[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 722: 137892.
- [13] LIPPMANN M, CHEN LC, GORDON T, et al. National Particle Component Toxicity (NPACT) Initiative: integrated epidemiologic and toxicologic studies of the health effects of particulate matter components[J]. *Res Rep Health Eff Inst*, 2013(177): 5-13.
- [14] ZENG Q, NI Y, JIANG G, et al. The short term burden of ambient particulate matters on non-accidental mortality and years of life lost: A ten-year multi-district study in Tianjin, China[J]. *Environ Pollut*, 2017, 220: 713-719.
- [15] LI X, XIAO J, LIN H, et al. The construction and validity analysis of AQHI based on mortality risk: A case study in Guangzhou, China[J]. *Environ Pollut*, 2017, 220: 487-494.
- [16] 王文韬, 孙庆华, 覃健, 等. 中国5个城市2013-2015年空气质量健康指数模拟研究[J]. *中华流行病学杂志*, 2017, 38(3): 314-319.
- WANG WT, SUN QH, Qin J, et al. Simulation study of air quality health index in 5 cities in China: 2013—2015[J]. *Chin J Epidemiol*, 2017, 38(3): 314-319.
- [17] 张莉君, 许慧慧, 朱凤鸣, 等. 上海市儿童呼吸系统疾病空气质量健康指数的建立[J]. *环境与职业医学*, 2022, 39(7): 730-736.
- ZHANG LJ, XU HH, ZHU FM, et al. Construction of an air quality health index for pediatric respiratory diseases in Shanghai[J]. *J Environ Occup Med*, 2022, 39(7): 730-736.
- [18] 樊琳, 倪洋, 曾强, 等. 基于五类空气质量指数的天津市环境空气质量评价[J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(9): 803-808.
- FAN L, NI Y, ZENG Q, et al. Air quality assessment based on five kinds of air quality indexes in Tianjin[J]. *J Environ Health*, 2018, 35(9): 803-808.
- [19] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市空气质量健康指数的构建及其应用[J]. *中华预防医学杂志*, 2012, 46(5): 443-446.
- CHEN RJ, CHEN BH, KAN HD. The establishment and application of Shanghai air quality health index[J]. *Chin J Prev Med*, 2012, 46(5): 443-446.
- [20] JERRETT M, BURNETT RT, BECKERMAN BS, et al. Spatial analysis of air pollution and mortality in California[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2013, 188(5): 593-599.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)

· 告知栏 ·

## 喜讯: 《环境与职业医学》入选 《预防医学与卫生学高质量科技期刊分级目录》

近日, 中华预防医学会在其网站公布了《预防医学与卫生学高质量科技期刊分级目录》, 这是我国本领域首次开展期刊分级工作, 由上海市疾病预防控制中心主办的《环境与职业医学》成功入选该目录。

为贯彻落实中国科协、中宣部、教育部、科技部联合印发的《关于深化改革培育世界一流科技期刊的意见》推动建设与世界科技强国相适应的科技期刊体系, 助力我国科技期刊高质量发展, 按照中国科协的统一部署, 中华预防医学会依据中国科协关于“价值导向、同行评议、等效使用”等原则要求, 组织建立了预防医学与卫生学高质量科技期刊评价指标体系, 采取定量和定性评价相结合的方式, 经过数据采集、期刊遴选、专家评议和专家评审委员会会议审核认定、公示、复审等程序, 最终形成2021年度《预防医学与卫生学高质量科技期刊分级目录》, 共收录期刊122种, 其中中文期刊33种, 外文期刊的89种。

《环境与职业医学》(*Journal of Environmental & Occupational Medicine, JEOM*)杂志, 创刊于1984年, 系由上海市疾病预防控制中心主办的专业性学术期刊, 以刊登中文文献为主(含英文摘要), 月刊。所有被录用的稿件均经过同行专家评议。纸质印刷版于每月25日出版。国际连续出版物号: ISSN 2095-9982; 国内统一连续出版物号: CN 31-1879/R。杂志主页: [www.jeom.org](http://www.jeom.org)。目前杂志已被中国科学引文数据库(CSCD)源期刊、中文核心期刊(北大核心)、中国科技论文统计源期刊(科技核心)、Scopus数据库、DOAJ数据库、EBSCO数据库、CABI数据库、美国剑桥科学文摘(自然科学)、美国化学文摘(CA)数据库等国内、国际著名数据库所收录。