

· 论 著 ·

# 基于大气污染物与寿命损失年的金华市 空气质量健康指数构建研究

何晓庆<sup>1</sup>, 罗进斌<sup>1</sup>, 陈强<sup>1</sup>, 许丹丹<sup>2</sup>

1.金华市疾病预防控制中心环境与职业卫生科, 浙江 金华 321002; 2.浙江省疾病预防控制中心, 浙江 杭州 310051

**摘要:** **目的** 基于大气污染物与人群寿命损失年(YLL)的暴露-反应关系构建浙江省金华市空气质量健康指数(AQHI), 评价空气质量健康风险。**方法** 通过金华市环境监测中心和金华市气象局收集2014—2021年金华市金东区和婺城区的大气污染物和气象资料, 通过浙江省慢性病监测信息管理系统收集同期居民非意外死亡资料; 采用广义相加模型(GAM)分析大气污染物与YLL的暴露-反应关系, 筛选主要污染物计算AQHI; 采用GAM分析AQHI与YLL的暴露-反应关系。**结果** 单污染物模型结果显示, PM<sub>2.5</sub>在滞后1 d对YLL影响最大, SO<sub>2</sub>在当日影响最大。双污染物模型结果显示, PM<sub>2.5</sub>在滞后1 d分别纳入其他污染物后, 对YLL的影响有统计学意义; SO<sub>2</sub>在当日纳入NO<sub>2</sub>后, 对YLL的影响有统计学意义(均 $P<0.05$ )。2014—2021年O<sub>3</sub>日均质量浓度超标率较高, 为42.27%。根据单污染物和双污染物模型分析结果、大气污染物超标情况和相关文献, 选择PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>为主要污染物计算AQHI。2014—2021年金华市AQHI  $M(Q_R)$ 为1.40(1.13), 按照AQHI分级标准, 94.55%的时间处于低风险, 4.93%的时间处于中风险。AQHI每升高1个 $Q_R$ , 对全人群、男性、女性、<65岁和≥65岁人群YLL的影响均有统计学意义, YLL分别增加6.21、3.26、6.46、4.24和10.57人年。**结论** 2014—2021年金华市大部分时间空气质量健康风险为低风险, AQHI升高与人群YLL风险增加有关。

**关键词:** 大气污染; 寿命损失年; 空气质量健康指数; 广义相加模型

**中图分类号:** R181.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5087(2024)12-1017-05

## Construction of air quality health index in Jinhua City based on air pollutants and years of life lost

HE Xiaqing<sup>1</sup>, LUO Jinbin<sup>1</sup>, CHEN Qiang<sup>1</sup>, XU Dandan<sup>2</sup>

1.Department of Environmental and Occupational Health, Jinhua Center for Disease Control and Prevention, Jinhua, Zhejiang 321002, China; 2.Zhejiang Provincial Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou, Zhejiang 310051, China

**Abstract: Objective** To construct air quality health index (AQHI) in Jinhua City, Zhejiang Province based on the exposure-response relationship between air pollutants and years of life lost (YLL), and evaluate the health risk associated with air quality. **Methods** Air pollutants and meteorological data in Jindong District and Wucheng District of Jinhua City from 2014 to 2021 were collected through Jinhua Environmental Monitoring Center and Jinhua Meteorological Bureau. Non-accidental death data of residents during the same period was collected through Zhejiang Chronic Disease Monitoring Information Management System. The exposure-response relationship between major air pollutants and YLL was analyzed using a generalized additive model (GAM), and major pollutants were screened for calculating AQHI. The exposure-response relationship between AQHI and YLL was analyzed using GAM. **Results** The results of single-pollutant model analysis showed that the lagged effect of PM<sub>2.5</sub> on YLL was the largest at lag of 1 day, and the effect of SO<sub>2</sub> on YLL was the largest on the same day. The results of dual-pollutant model analysis showed that the impact of

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2024.12.002

基金项目: 金华市科学技术研究项目(2021-4-239)

作者简介: 何晓庆, 硕士, 副主任医师, 主要从事环境与职业卫生工作, E-mail: jhedchxq@163.com

PM<sub>2.5</sub> on YLL was statistically significant when other pollutants were included at a lag of 1 day, and the impact of SO<sub>2</sub> on YLL was statistically significant when NO<sub>2</sub> was included on the same day (all  $P < 0.05$ ). The average daily mass concentration of O<sub>3</sub> exceeded the standard by a relatively high rate of 42.27% from 2014 to 2021. Based on the analysis results of single-pollutant and two-pollutant models, excessive pollutant condition and relevant research findings, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> were selected as the major pollutants for calculating the AQHI. The median AQHI value of 1.40 (interquartile range, 1.13) from 2014 to 2021. According to the AQHI classification standard, 94.55% was the time was at low risk, and 4.93% of the time was at medium risk. With an increase in AQHI by one interquartile range, the YLL among the entire population, males, females, <65-year-old and ≥65-year-old populations would increase 6.21, 3.26, 6.46, 4.24 and 10.57 person-years, respectively. **Conclusions** The air quality health risk in Jinhua City was low at most of the time from 2014 to 2021. An increase in AQHI was associated with an increased risk of YLL among population.

**Keywords:** air pollution; years of life lost; air quality health index; generalized additive model

寿命损失年 (years of life lost, YLL) 是人群过早死亡的疾病负担指标。研究显示大气污染物短期暴露使 YLL 风险增加<sup>[1-2]</sup>。因此全面、准确评价空气质量并预警其健康风险利于减少人群暴露于大气污染物的机会,降低大气污染疾病负担。2013年我国开始采用空气质量指数 (air quality index, AQI) 向公众提示大气质量及其健康风险<sup>[3]</sup>,但该指标仅考虑主要污染物的单独作用,未考虑到多种大气污染物的累积和联合作用,在一定程度上可能低估大气污染物的健康风险<sup>[4-5]</sup>。空气质量健康指数 (air quality health index, AQHI) 是一种综合考虑多种大气污染物对人群健康影响而构建的空气质量评价指标,2007年由加拿大学者提出<sup>[6]</sup>,通过流行病学方法分析当地主要空气污染物与人群健康结局的暴露-反应关系,能更准确地反映空气质量健康风险。金华市是浙江省中部城市,地形为丘陵盆地,不利于大气污染物扩散,本研究通过大气污染物与人群 YLL 的暴露-反应关系构建金华市 AQHI,评价空气质量健康风险,为完善大气污染防治提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

2014—2021年金华市主城区(婺城区和金东区)大气污染物资料来源于金华市环境监测中心,覆盖3个国控环保监测站点(金东区1个,婺城区2个),包括细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和臭氧(O<sub>3</sub>)日均质量浓度及每日AQI资料。以3个国控环保监测站点的大气污染物和AQI日均值代表金华市水平。同期气象资料来源于金华市气象局,有1个国控气象监测点,包括日均温度和日均相对湿度资料。同期居民死亡资料来源于浙江省慢性病监测信息管理系

统,采用《疾病和有关健康问题的国际统计分类(第十次修订本)》(ICD-10)编码,收集非意外死亡(A00~R99)病例资料。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 描述性分析

YLL计算公式:  $YLL = N_i \times L_i$ ,其中  $N_i$  为各年龄组的死亡人数,  $L_i$  为各死亡年龄组的标准寿命表减寿年数<sup>[7]</sup>。建立2014—2021年金华市大气污染物、气象因素和YLL的时间序列数据库,描述性分析大气污染物、气象因素和YLL基本情况。

#### 1.2.2 AQHI计算

采用广义相加模型 (generalized additive model, GAM)<sup>[8]</sup> 评估大气污染物质量浓度与YLL的暴露-反应关系,大气污染物对YLL的影响以模型计算出的 $\beta$ 值(即YLL的增加量)表示。先采用单污染物模型分别计算滞后0~3d时PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>与YLL的暴露-反应关系,筛选最佳滞后时间,再基于最佳滞后时间建立双污染物模型,根据某种大气污染物对YLL的暴露-反应关系系数在单污染物模型和双污染物模型中是否具有统计学意义,同时参考相关文献和大气污染物的超标情况选择主要污染物计算AQHI<sup>[9-10]</sup>,公式如下。

$$ER_i = 100 \times [\exp(\beta_i \times Z_i) - 1]$$

$$AQHI = (ER_{tot} / ER_{max}) \times 10$$

式中:  $ER_i$  为污染物  $i$  在第  $t$  天导致的超额风险;  $\beta_i$  为污染物  $i$  的暴露-反应关系系数;  $Z_i$  为污染物  $i$  在第  $t$  天的平均质量浓度;  $ER_{tot}$  为各污染物所导致的超额风险  $ER_i$  之和;  $ER_{max}$  为研究期间最大的日超额风险。

#### 1.2.3 AQHI 分级与评估

参考文献[11-12],AQHI分为4个风险级别,0~3为低风险,4~6为中风险,7~10为高风险,>10为极高风险。采用GAM分析AQHI、AQI与

YLL 的关系, 比较 AQHI 和 AQI 每变化 1 个四分位数间距 ( $Q_R$ ), YLL 的风险变化值和模型的决定系数 ( $R^2$ ),  $R^2$  值越大表明模型的拟合度和预测能力越好<sup>[9, 11, 13]</sup>。采用 R 4.3.1 软件统计分析, 检验水准  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 2014—2021 年金华市大气污染物和 YLL 基本情况

2014—2021 年金华市  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  的日均质量浓度  $M(Q_R)$  分别为 35.00 (30.00)、10.00 (11.00)、32.00 (23.00) 和 88.00 (69.00)  $\mu g/m^3$ 。日均相对湿度为  $(73.02 \pm 14.16)\%$ 。日均 YLL  $M(Q_R)$  为 257.91 (153.84) 人年。日均 AQI  $M(Q_R)$  为 69.00 (41.00)。

### 2.2 2014—2021 年金华市 AQHI 值

单污染物模型分析结果显示,  $PM_{2.5}$  在当日、滞后 1 d、滞后 2 d 对 YLL 的影响有统计学意义;  $SO_2$  在当日对 YLL 的影响有统计学意义 (均  $P < 0.05$ )。  $PM_{2.5}$  在滞后 1 d 对 YLL 影响最大,  $SO_2$  在当日影响最大。  $NO_2$  和  $O_3$  对 YLL 的影响无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ), 见图 1。  $PM_{2.5}$  选择滞后 1 d,  $SO_2$  选择当日为最佳滞后时间, 建立双污染物模型。结果显示,  $PM_{2.5}$  在滞后 1 d 分别纳入其他污染物后, 对 YLL 的影响仍有统计学意义 (均  $P < 0.05$ )。  $SO_2$  在当日纳入  $NO_2$  后, 对 YLL 的影响有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 分别纳入  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  后, 对 YLL 的影响无统计学意义 (均  $P > 0.05$ ), 见图 2。

参照 GB 3095—2012《环境空气质量标准》一级 (100  $\mu g/m^3$ ) 和二级浓度限值 (160  $\mu g/m^3$ )<sup>[14]</sup>, 2014—2021 年  $O_3$  日均质量浓度超标率较高, 分别为 42.27% (1 235/2 922) 和 9.27% (271/2 922)。

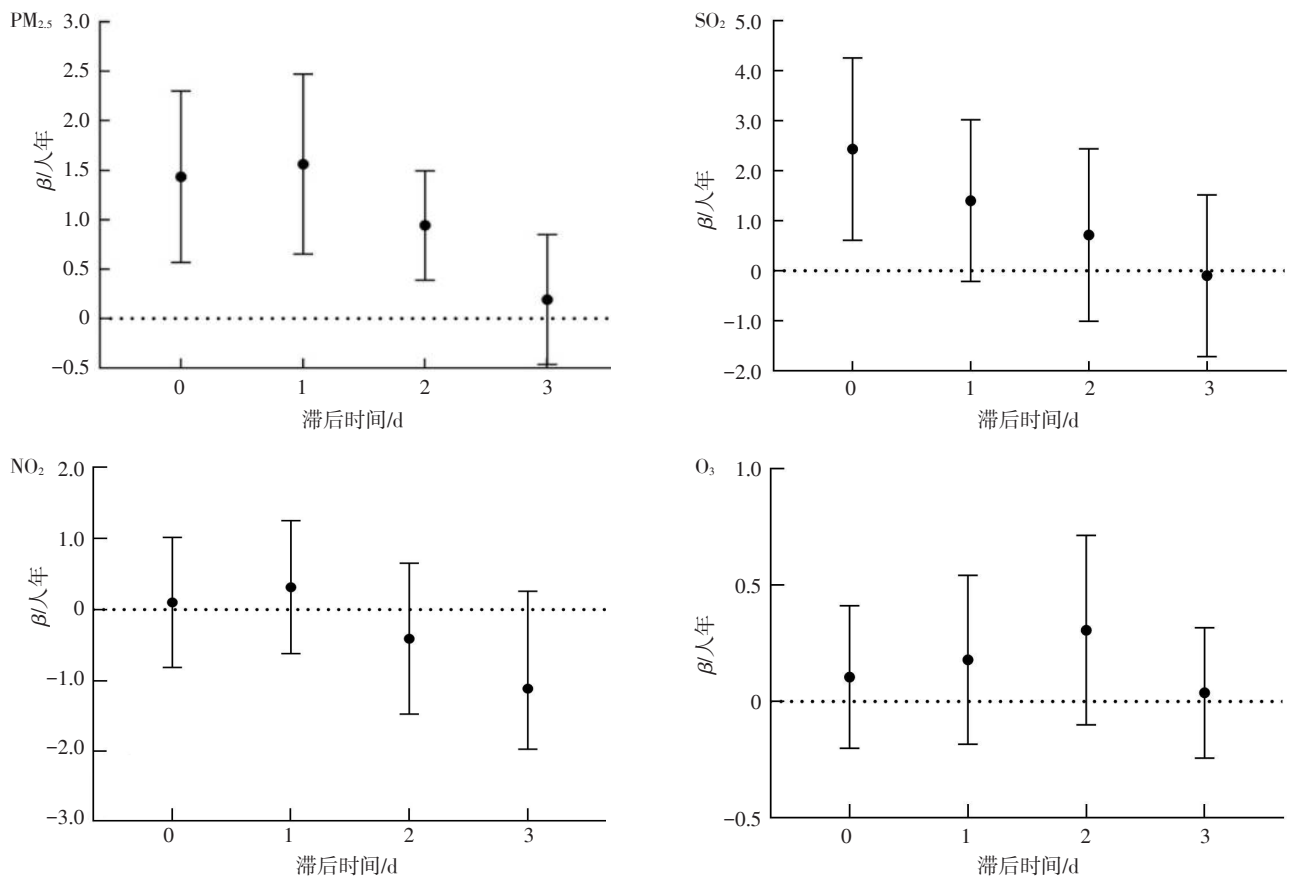


图 1 大气污染物与 YLL 暴露-反应关系的单污染物模型分析结果

Figure 1 The analysis results of the single-pollutant model for the exposure-response relationship between air pollutants and YLL

参考既往研究<sup>[15-18]</sup>, 选择  $PM_{2.5}$  (滞后 1 d)、 $SO_2$  (当日)、 $NO_2$  (当日) 和  $O_3$  (当日) 为主要污染物纳入多污染物模型, 获得大气污染物质量浓度对

YLL 的暴露-反应关系系数, 分别为 0.001 06、0.002 22、0.000 07 和 0.000 02, 将系数代入公式计算获得 AQHI。2014—2021 年金华市 AQHI 范围为

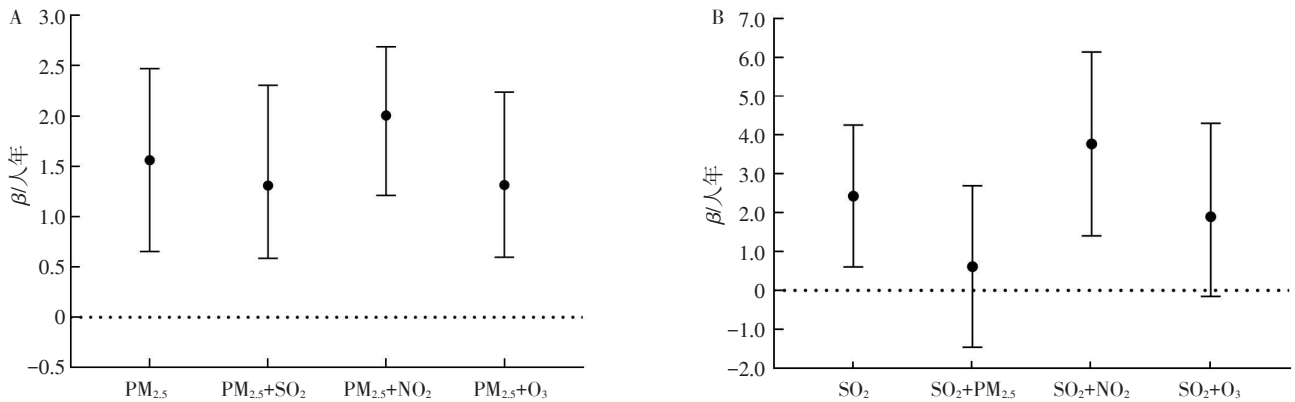


图2 大气污染物与YLL暴露-反应关系的双污染物模型分析结果

Figure 2 The analysis results of the two-pollutant model for the exposure-response relationship between air pollutants and YLL

0.22~10.00,  $M(Q_R)$  为 1.40 (1.13)。

### 2.3 AQHI 评估空气质量健康风险

根据 AQHI 分级标准, 2014—2021 年金华市空气质量对人群健康的影响有 94.55% 的时间处于低风险, 有 4.93% 的时间处于中风险。GAM 分析结果显示, AQHI 每升高 1 个  $Q_R$ , YLL 增加 6.21 人年; 分层分析结果显示, AQHI 与不同性别、年龄人群 YLL 的暴露-反应关系有统计学意义 (均  $P < 0.05$ )。

AQHI 和 AQI 的  $R^2$  值均介于 0.5~0.7, 说明模型的拟合效果较好; 对于全人群, AQHI 的  $R^2$  值高于 AQI, 说明 AQHI 预测人群健康的效果较好。见表 1。

表 1 AQHI 和 AQI 每升高 1 个  $Q_R$  导致的人群 YLL 风险

Table 1 The YLL risk caused by an increase of one interquartile range in AQHI and AQI

组别	AQHI		AQI	
	YLL [ $\beta$ (95%CI) / 人年]	$R^2$	YLL [ $\beta$ (95%CI) / 人年]	$R^2$
全人群	6.21 (0.87~11.54) <sup>①</sup>	0.697	4.52 (0.02~8.48) <sup>①</sup>	0.695
男性	3.26 (0.32~6.21) <sup>①</sup>	0.610	2.12 (-0.21~4.45)	0.609
女性	6.46 (2.53~10.39) <sup>①</sup>	0.542	5.74 (2.63~8.86) <sup>①</sup>	0.543
<65岁	4.24 (0.47~8.02) <sup>①</sup>	0.616	2.97 (-0.02~5.96)	0.613
≥65岁	10.57 (5.98~15.16) <sup>①</sup>	0.692	5.25 (1.61~8.90) <sup>①</sup>	0.692

注: <sup>①</sup>表示  $P < 0.05$ 。

### 3 讨论

本研究以 YLL 作为研究结局计算 AQHI, 反映金华市大气污染物导致的健康风险。先采用单污染模型和双污染模型筛选出具有统计学意义的污染物  $PM_{2.5}$  和  $SO_2$ , 但仅通过 2 种污染物计算 AQHI 较单薄。同时本研究发现金华市主城区  $O_3$  的日均质量浓

度超标率较高, 且  $O_3$  具有强氧化性, 对呼吸道产生强烈刺激, 引发胸闷咳嗽、咽喉肿痛等, 严重引发哮喘、肺气肿和肺组织损伤等问题<sup>[19]</sup>。 $NO_2$  可刺激呼吸道, 加重呼吸系统疾病, 导致人群总死亡率升高, 也是新生儿低出生体重和早产的危险因素之一<sup>[20]</sup>。国内外研究表明  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  对总死亡率、心血管死亡率和呼吸系统死亡率具有协同效应<sup>[21]</sup>, 故本研究最终选择  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  作为主要污染物计算 AQHI。

参考相关文献<sup>[10-13]</sup>, 采用上述大气污染物建立多污染物模型计算金华市 AQHI, 其预测能力更强。天津市一项研究采用主成分分析法构建 AQHI, 但主成分的累积贡献率仅为 70%<sup>[22]</sup>, 这可能会导致暴露-反应关系被低估。主成分分析法在一定程度上控制多种污染物的相关性, 但其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, 由此构建的 AQHI 会低估大气污染物对人群健康的影响。

2014—2021 年金华市 AQHI 范围为 0.22~10.00,  $M(Q_R)$  为 1.40 (1.13), 整体呈右偏态分布, 这与加拿大研究人员基于  $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  构建的 AQHI 分布趋势一致<sup>[6]</sup>。本研究结果表明, 空气质量对人群健康的影响有 94.55% 的时间处于低风险, 有 4.93% 的时间处于中风险。本次 AQHI 分级标准主要参考既往研究的分级方法<sup>[12]</sup>, 但不同研究数据和结果可能存在差异, 一定程度上会低估 AQHI 的风险级别, 尤其高风险。因此, 需要对 AQHI 的分级标准深入研究, 以探索出更加适合本地区情况的分级标准, 确保 AQHI 分级的准确性和科学性。

AQHI 的优势是将多种大气污染物对人群健康风险之间的线性无阈值关系进行综合。本研究结果发现, AQHI 每升高 1 个  $Q_R$ , 对全人群、男性、女性

和 $\geq 65$ 岁人群 YLL 的超额风险均高于 AQI 的相应指标效应值,表明 AQHI 对大气污染物质量浓度变化的敏感性高于 AQI。对于全人群, AQHI 模型的  $R^2$  值略高于 AQI 模型的  $R^2$  值,说明 AQHI 预测人群健康的效果较好,与天津市研究结果<sup>[23-24]</sup>一致。提示基于大气污染物与 YLL 暴露-反应关系计算的 AQHI 可作为一种更为精准的工具,评估和预测空气污染对金华市居民健康的影响。

本研究存在一定局限性。以监测站点大气污染物质量浓度的平均水平作为人群的暴露浓度。将  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  作为主要污染物纳入模型计算 AQHI,未考虑到 CO 和超细颗粒等其他污染物对健康的影响,4 种污染物之间的联合作用,以及气象因素与 YLL 的相关性。

#### 参考文献

- [1] NI Y, SONG W, BAI Y, et al. Years of life lost (YLL) due to short-term exposure to ambient air pollution in China: a systematic review and meta-analysis [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18 (21): 1-17.
- [2] 曲玥, 曾芳婷, 陈凤格, 等. 石家庄市儿童呼吸系统疾病空气质量健康指数的构建 [J]. *环境卫生学杂志*, 2023, 13 (1): 37-43.
- [3] 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.
- [4] HU J L, YING Q, WANG Y G, et al. Characterizing multi-pollutant air pollution in China: comparison of three air quality indices [J]. *Environ Int*, 2015, 84: 17-25.
- [5] 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/OL]. *Environ Monit Assess*, 2015, 187 (5) [2024-10-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25877648>. DOI: 10.1007/s10661-015-4500-z.
- [6] STIEB D M, BURNETT R T, 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.
- [7] World Health Organization. WHO methods and data sources for global burden of disease estimates, 2000-2016 [EB/OL]. [2024-10-25]. [https://terrance.who.int/mediacentre/data/ghe/Global-COD\\_method\\_2000\\_2016.pdf?ua=1](https://terrance.who.int/mediacentre/data/ghe/Global-COD_method_2000_2016.pdf?ua=1).
- [8] 何晓庆, 罗进斌, 王小红, 等. 金华市大气污染物短期暴露对居民死亡和寿命损失年的影响 [J]. *预防医学*, 2024, 36 (5): 383-387.
- [9] LI X, XIAO J P, LIN H L, 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.
- [10] 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.
- [11] CAO R, WANG Y X, HUANG J, et al. The construction of the air quality health index (AQHI) and a validity comparison based on three different methods [J/OL]. *Environ Res*, 2021, 197 [2024-10-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33689821>. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110987.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [15] 李朝康, 龚科米, 吕焯, 等. 杭州市大气污染对居民死亡的影响研究 [J]. *预防医学*, 2023, 35 (1): 11-16.
- [16] 关新朋, 徐洪兵, 方嘉堃, 等. 大气  $NO_x$  和  $NO_2$  急性暴露与儿童呼吸系统疾病门诊量的关联研究 [J]. *预防医学*, 2023, 35 (3): 185-189.
- [17] 张丽, 张晓飞, 石国秀, 等. 宁波市  $O_3$  与气象因素短期暴露对死亡人数的影响及交互作用 [J]. *中华疾病预防控制杂志*, 2023, 27 (5): 522-527.
- [18] 韦正峥, 郭云, 吕梅乐, 等. 浙江省丽水市空气质量的健康效应分析 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40 (8): 3294-3302.
- [19] ANENBERG S C, HOROWITZ L W, TONG D Q, et al. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling [J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118 (9): 1189-1195.
- [20] LEPEULE J, CAINI F, BOTTAGISI S, et al. Maternal exposure to nitrogen dioxide during pregnancy and off spring birth weight: comparison of two exposure models [J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118 (10): 1483-1489.
- [21] LIU C, CHEN R J, SERA F, et al. Interactive effects of ambient fine particulate matter and ozone on daily mortality in 372 cities: two stage time series analysis [J/OL]. *BMJ*, 2023 [2024-10-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37793695>. DOI: 10.1136/bmj-2023-075203.
- [22] 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/OL]. *Sci Total Environ*, 2020 [2024-10-25]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31923661>. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136264.
- [23] 康梦蕾, 倪洋, 曾强, 等. 基于老年人群循环系统疾病寿命损失年的天津市空气质量健康指数的初步构建 [J]. *环境与健康杂志*, 2020, 37 (8): 684-687.
- [24] 樊琳. 基于大气污染与寿命损失年暴露反应关系的空气质量健康指数的初步建立 [D]. 天津: 天津医科大学, 2019.

收稿日期: 2024-07-24 修回日期: 2024-10-25 本文编辑: 徐亚慧