

# 天津市大气颗粒物对健康影响的季节性差异研究

张梦楠<sup>1,2</sup>, 倪洋<sup>2</sup>, 曾强<sup>1,2</sup>

1. 天津医科大学公共卫生学院, 天津 300070

2. 天津市疾病预防控制中心职业健康研究所, 天津 300011

## 摘要:

**[背景]** 大气颗粒物对健康的不良影响已得到证实, 但关于健康影响季节性模式的研究结果并不一致。

**[目的]** 探讨天津市大气颗粒物( $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ )对每日非意外死亡率和相应寿命损失年(YLL)影响的季节性变化。

**[方法]** 收集天津市 2014—2019 年的逐日死亡资料、大气污染资料和气象资料, 采用分层分析和时间序列分析相结合的方法。通过构建广义相加模型定量地评估  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  与每日非意外死亡和 YLL 之间的关系, 模型中控制气温、相对湿度、长期趋势、星期几效应和节假日效应等混杂因素。

**[结果]** 全年、春季、夏季和秋季时  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  对每日非意外死亡率和相应 YLL 的影响有统计学意义(除了春季  $PM_{10}$  对非意外死亡 YLL 的影响无统计学意义外), 冬季时的影响均无统计学意义。全年及春、夏、秋季的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度每增加  $10 \mu g \cdot m^{-3}$ , 非意外死亡率及其 95%CI 的增加值分别为: 全年 0.28%(0.11%~0.44%) 和 0.24%(0.11%~0.36%), 春季 0.44%(0.11%~0.77%) 和 0.17%(0.00%~0.33%), 夏季 1.32%(0.50%~2.16%) 和 2.15%(1.54%~2.76%), 秋季 0.68%(0.30%~1.06%) 和 0.57%(0.28%~0.87%); 相应的 YLL 及其 95%CI 的增加值分别为: 全年 7.41(2.42~13.07) 和 5.75(1.94~9.57) 人年, 春季 13.11(3.00~23.22) 和 2.88(-2.82~8.59) 人年, 夏季 34.66(11.92~57.40) 和 48.12(31.48~64.75) 人年, 秋季 16.13(4.57~27.70) 和 12.60(3.56~21.65) 人年。以全球空气质量指南(2021)中的限值为参考时, 夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露导致的超额死亡人数和超额 YLL 最大, 平均每日由  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露导致的超额死亡人数及其 95%CI 分别为 5.38(5.08~5.69)、8.62(7.95~9.28), 超额 YLL 及其 95%CI 分别为 112.23(105.79~118.67)、156.94(144.99~168.89) 人年。

**[结论]** 天津市大气颗粒物对非意外死亡的影响存在明显的季节性差异, 其中夏季的不良健康影响最强, 提示夏季更应该加强大气颗粒物相关健康防护。

**关键词:** 季节性; 大气颗粒物; 死亡率; 寿命损失年; 暴露-反应关系

**Seasonal variation in health effects of particulate matter in Tianjin** ZHANG Mengnan<sup>1,2</sup>, NI Yang<sup>2</sup>, ZENG Qiang<sup>1,2</sup> (1. School of Public Health, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China; 2. Institute for Occupational Health, Tianjin Centers for Disease Control and Prevention, Tianjin 300011, China)

## Abstract:

**[Background]** Adverse health effects associated with particulate matter have been demonstrated, but findings on seasonal variation in the health impacts are inconsistent.

**[Objective]** To explore potential seasonal variation in particulate matter ( $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ ) associated daily non-accidental mortality and corresponding years of life loss (YLL) in Tianjin.

**[Methods]** The daily data of non-accidental deaths, air pollution, and meteorological factors in Tianjin from 2014 to 2019 were collected. A generalized additive model, with adjusting selected confounding factors such as temperature, relative humidity, long-term trends, day of the week, and holiday, was used to quantitatively evaluate the relationships of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  with daily non-accidental deaths and YLL.



DOI 10.11836/JEOM21480

## 基金项目

国家自然科学基金项目(81872590); 天津市医学重点学科(专科)建设项目(2021); 天津市卫生健康科技项目青年人才项目(TJWJ2021QN030)

## 作者简介

张梦楠(1997—), 女, 硕士生;  
E-mail: z1696053153@163.com

## 通信作者

曾强, E-mail: zengqianghaiyan@126.com

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-10-29

录用日期 2022-04-19

文章编号 2095-9982(2022)06-0652-07

中图分类号 R122

文献标志码 A

## 补充材料

[www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21480](http://www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21480)

## ► 引用

张梦楠, 倪洋, 曾强. 天津市大气颗粒物对健康影响的季节性差异研究 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(6): 652-658.

## ► 本文链接

[www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21480](http://www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21480)

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

ZENG Qiang, E-mail: zengqianghaiyan@126.com

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2021-10-29

Accepted 2022-04-19

## Supplemental material

[www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21480](http://www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21480)

## ► To cite

ZHANG Mengnan, NI Yang, ZENG Qiang. Seasonal variation in health effects of particulate matter in Tianjin[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(6): 652-658.

## ► Link to this article

[www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21480](http://www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21480)

**[Results]** The effects of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  on daily non-accidental mortality and corresponding YLL were statistically significant in full year, spring, summer, and autumn (except for the effect of  $PM_{10}$  on non-accidental YLL in spring), but not statistically significant in winter. The non-accidental mortality and its 95%CI increased by 0.28% (0.11%-0.44%) and 0.24% (0.11%-0.36%) in full year, 0.44% (0.11%-0.77%) and 0.17% (0.00%-0.33%) in spring, 1.32% (0.50%-2.16%) and 2.15% (1.54%-2.76%) in summer, and 0.68% (0.30%-1.06%) and 0.57% (0.28%-0.87%) in autumn for every  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  increase in  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentrations, respectively; the corresponding YLL and its 95%CI increased by 7.41 (2.42-13.07) and 5.75 (1.94-9.57), 13.11 (3.00-23.22) and 2.88 (-2.82-8.59), 34.66 (11.92-57.40) and 48.12 (31.48-64.75), and 16.13 (4.57-27.70) and 12.60 (3.56-21.65) person-years, respectively. When adopting the limits in the Global Air Quality Guidelines (2021) as the reference, excess deaths and YLL caused by  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  exposure were the greatest in summer. The excess deaths and its 95%CI were 5.38 (5.08-5.69) and 8.62 (7.95-9.28), and the excess YLL and its 95%CI were 112.23 (105.79-118.67) and 156.94 (44.99-168.89) person-years, respectively.

**[Conclusion]** The effects of particulate matter on non-accidental mortality and corresponding YLL may vary seasonally in Tianjin with the greatest effects in summer, suggesting that the health protection related to particulate matter should be strengthened in summer.

**Keywords:** seasonal; particulate matter; mortality; years of life lost; exposure-response relationship

大气颗粒物对健康的不良影响已得到国内外大量流行病学研究的证实<sup>[1-3]</sup>,但是针对不同季节大气颗粒物健康效应差异的研究较少。不同季节条件下人口的暴露模式及颗粒物的浓度、来源和成分不同,而颗粒物的毒性因其化学成分而异<sup>[4-5]</sup>,这可能导致其对健康的影响随季节变化。此外,一些潜在的随时间变化的因素如温度、湿度及流感流行等会在不同的季节以不同方式影响颗粒物对健康结局的作用<sup>[6-7]</sup>。因此,季节可能是大气颗粒物对健康不利影响的一个重要修饰因子。探讨大气颗粒物对健康影响的季节性差异,对提出颗粒物成分的毒性假设及制定有针对性的大气污染防治政策至关重要<sup>[8]</sup>。

现有的探讨不同季节大气颗粒物对健康影响差异的研究中,研究者发现颗粒物对健康的影响存在明显季节性差异,但季节性差异模式并不一致<sup>[9-15]</sup>。天津市作为重要的工业城市之一,近年来在经济快速发展的同时也产生了严重的大气污染问题,其中颗粒物污染最甚。为进一步探讨大气颗粒物污染对健康影响的季节性差异,本研究拟以天津市 2014—2019 年期间的大气污染和人群死因监测等数据作为基础资料,评估不同季节条件下  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  对每日非意外总死亡和相应寿命损失年 (years of life lost, YLL) 的影响。YLL 是常用的疾病负担指标之一,与死亡率相比,其考虑了死亡时的预期寿命,并对不同年龄的死亡提供了不同的权重,能更好地反映人群的健康变化情况。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据收集

本研究收集天津市 2014 年 1 月 1 日—2019 年 12 月 31 日的逐日大气污染物、气象和死亡数据。

大气污染物数据来源于天津市环境监测中心,污

染物包括  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  等。气象监测数据来源于天津市气象局,气象指标包括每日平均气温和平均相对湿度等。

每日死亡数据由天津市疾病预防控制中心提供,数据包括死亡日期、死亡年龄、性别等信息。非意外总死亡按照国际疾病分类第 10 版的编码规则编码为 A00-R99。YLL 的计算参照 2010 年全球疾病负担研究中使用的公式<sup>[16]</sup>,即 YLL 的值( $V_{YLL}$ )为  $N$  与  $L$  的乘积。其中  $N$  为某原因导致的死亡人数, $L$  为各年龄段死亡的标准寿命表减寿年数,本研究中  $L$  采用的是世界卫生组织推荐的标准寿命减寿年数表。上述数据使用已经天津市疾病预防控制中心生物医学研究伦理审查 (伦理项目编号: TJCDC222)。

### 1.2 统计分析

本研究采用广义相加模型建立颗粒物( $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$ )与健康结局(死亡率和 YLL)之间的关系,同时在模型中控制温度、湿度、长期变化趋势、星期几效应和节假日效应等混杂因素的影响。为了探讨颗粒物对健康影响的季节性差异,本研究将数据分成春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月—次年 2 月)4 个季节,采用分层分析的方法分别纳入模型进行统计分析,构建的模型如下:

$$g(E(Y_t)) = \alpha + \beta X_t + \sum S_j(Z_j) + V_{DOW} + V_{Holiday} \quad (1)$$

(1) 式中:  $g()$  为连接函数,以死亡率为健康结局时选择对数函数( $\lg$ ),以 YLL 为健康结局时选择高斯函数拟合;  $E(Y_t)$  指第  $t$  日健康结局的期望值;  $\alpha$  是截距;  $X_t$  指第  $t$  天  $PM_{2.5}$  或  $PM_{10}$  的平均质量浓度(后称:浓度);  $\beta$  为  $PM_{2.5}$  或  $PM_{10}$  与健康结局之间暴露-反应关系系数;  $s()$  为非参数平滑函数,用来控制温度(考虑温度的滞后效应,采用 21 d 移动平均温度)、湿度及长期变化趋势的混杂影响。根据文献<sup>[1-2]</sup>,温度、湿度的

自由度均选择 3, 全年分析时长期变化趋势的自由度选择每年为 7, 按季节分析时长期变化趋势的自由度选择每季节为 4;  $V_{DOW}$  表示一周中的 7 d, 用数字 1~7 表示;  $V_{Holiday}$  是一个二分类变量, 表示是否为节假日。

考虑到大气污染物对健康影响的滞后效应, 本研究对当日至前 3 日单日滞后(lag0—lag3)的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度和当日至前 1—3 天移动平均滞后(lag01—lag03)的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度进行分析, 选择有统计学意义的最强效应作为最后的效应值。为了评估模型的稳健性, 本研究还通过改变时间变量的自由度(全年: 6~8; 季节: 3~5)和温度的最长滞后时间(14、21、28 d)进行了模型的敏感性分析。

在获得不同季节颗粒物与健康结局之间的暴露-反应关系值后, 根据以下公式计算不同季节条件下平均每日由颗粒物暴露导致的超额死亡人数和超额 YLL 的值:

$$Y_{et} = R_{ER} \times (X_t - X_s) \times Y_{\text{总}t} \quad (2)$$

$$V_{YLL_{et}} = \beta \times (X_t - X_s) \quad (3)$$

(2)(3)式中:  $Y_{et}$  和  $V_{YLL_{et}}$  分别表示第  $t$  日由颗粒物暴露导致的超额死亡人数和超额 YLL;  $R_{ER}$  表示超额危

险度(excess risk,  $ER$ )的值,  $R_{ER} = (e^\beta - 1) \times 100\%$ ;  $X_t$  为第  $t$  日颗粒物的浓度;  $X_s$  为颗粒物的目标值, 包括我国 GB 3095—2012《环境空气质量标准》中的二级浓度限值( $PM_{2.5}$ :  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$ :  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和全球空气质量指南(2021)中的限值( $PM_{2.5}$ :  $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$ :  $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $Y_{\text{总}t}$  指第  $t$  日的总死亡人数。

本研究主要统计分析均采用 R 软件(4.0.4 版)的“mgcv”包和“tsModel”包完成。

## 2 结果

### 2.1 描述性统计结果

研究期间共记录到非意外总死亡 327770 例, 全年和春、夏、秋、冬季的平均每日死亡为 147.2、145.0、136.1、148.7、168.8 例, 相应的 YLL 值分别为 2987.7、2982.4、2840.3、3030.3、3381.3 人年。全年  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的日平均浓度分别为  $65.6$ 、 $105.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 春季为  $64.6$ 、 $122.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 夏季为  $47.8$ 、 $76.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 秋季为  $63.2$ 、 $96.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 冬季为  $85.1$ 、 $126.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。整个研究期间每日平均温度达  $9.9^\circ\text{C}$ , 春、夏、秋、冬四季分别为  $15.5$ 、 $26.7$ 、 $14.0$ 、 $-0.7^\circ\text{C}$ (表 1)。

表 1 2014—2019 年天津市大气颗粒物、气象因素及健康结局的描述性分析结果( $\bar{x} \pm s$ )

Table 1 Descriptive statistics on particulate matter, meteorological factors, and health outcomes in Tianjin from 2014 to 2019 ( $\bar{x} \pm s$ )

| 因素(Factor)                    | 指标 (Variable)  | 全年 (Full year) | 春季 (Spring)  | 夏季 (Summer)  | 秋季 (Autumn)  | 冬季 (Winter)   |
|-------------------------------|--|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 大气颗粒物<br>Particulate matter   | $PM_{2.5}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$                         | 65.6±50.6      | 64.6±39.4    | 47.8±22.1    | 63.2±48.2    | 85.1±67.4     |
|                               | $PM_{10}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$                          | 105.8±69.2     | 122.6±72.3   | 76.4±31.8    | 96.9±58.9    | 126.1±83.2    |
| 气象因素<br>Meteorological factor | 日均温度/ $^\circ\text{C}$<br>Daily mean temperature/ $^\circ\text{C}$ | 9.9±11.2       | 15.5±6.8     | 26.7±2.7     | 14.0±7.6     | -0.7±3.1      |
|                               | 日均相对湿度/%<br>Daily mean relative humidity/%                         | 55.4±18.8      | 45.1±16.0    | 64.6±15.3    | 60.8±16.4    | 50.8±20.2     |
| 健康结局<br>Health outcome        | 每日非意外死亡人数<br>Daily non-accidental mortality                        | 147.2±50.4     | 145.0±42.5   | 136.1±42.6   | 148.7±44.5   | 168.8±58.6    |
|                               | 每日非意外死亡 YLL/(人年)<br>Daily non-accidental YLL/(person-year)         | 2987.7±1029.1  | 2982.4±876.7 | 2840.3±890.0 | 3030.3±907.4 | 3381.3±1167.0 |

### 2.2 不同季节颗粒物与健康结局之间的暴露-反应关系

全年、春季、夏季和秋季时  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  对非意外总死亡率和相应 YLL 的影响有统计学意义( $P < 0.05$ ) (除了春季  $PM_{10}$  对非意外死亡 YLL 的影响无统计学意义外); 其中夏季的影响最强, 最大效应出现在 lag03, 此时  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度(lag03)每增加  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 非意外总死亡率及其 95%CI 分别增加 1.32%(0.50%~2.16%)、2.15%(1.54%~2.76%), 相应的 YLL 及其 95%CI 分别增加 34.66(11.92~57.40)、48.12(31.48~64.75) 人年。冬季时的影响均无统计学意义。(图 1—图 4)。

### 2.3 敏感性分析

为检验模型结果的稳定性, 更改模型中时间变量的自由度(全年: 6~8; 季节: 3~5)和温度的最长滞后时间(14~28 d), 结果显示改变模型参数时效应值变化不大, 表明模型稳定性较好。详见补充材料表 S1—S4。

### 2.4 不同季节颗粒物暴露导致的超额死亡人数和超额 YLL

以全球空气质量指南(2021)中的限值为参考时, 夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露所导致的超额死亡人数和超额 YLL 最大, 平均每日由  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露所导致的超额死亡人数分别为 5.38(95%CI: 5.08~5.69)、8.62(95%CI: 7.95~9.28), 超额 YLL 及其 95%CI 分别为

112.23(105.79~118.67)、156.94(144.99~168.89)人年。然而以中国环境空气质量标准中的二级浓度限值为

参考时,平均每日由PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>暴露导致的超额死亡人数和超额YLL在夏季时较低,秋季较高。见表2。

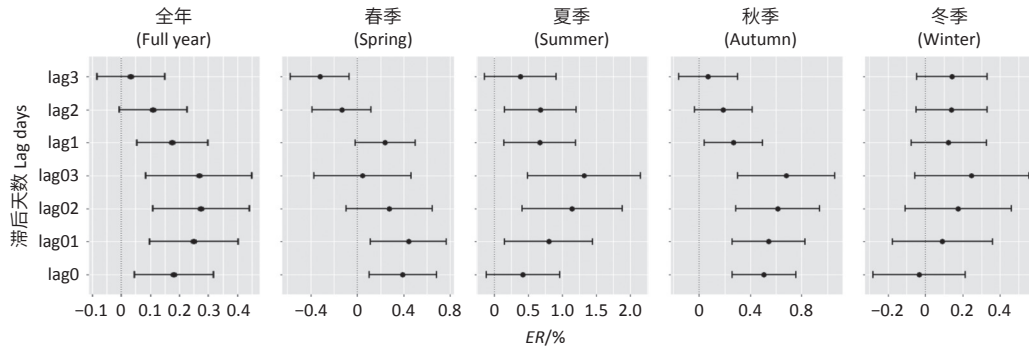


图1 不同季节和滞后天数PM<sub>2.5</sub>浓度每增加10 µg·m<sup>-3</sup>致非意外死亡的超额危险度[ER(95%CI)]/%

Figure 1 Season-specific excess risks of non-accidental mortality with per 10 µg·m<sup>-3</sup> increase in PM<sub>2.5</sub> at different lag days [ER (95%CI)]/%

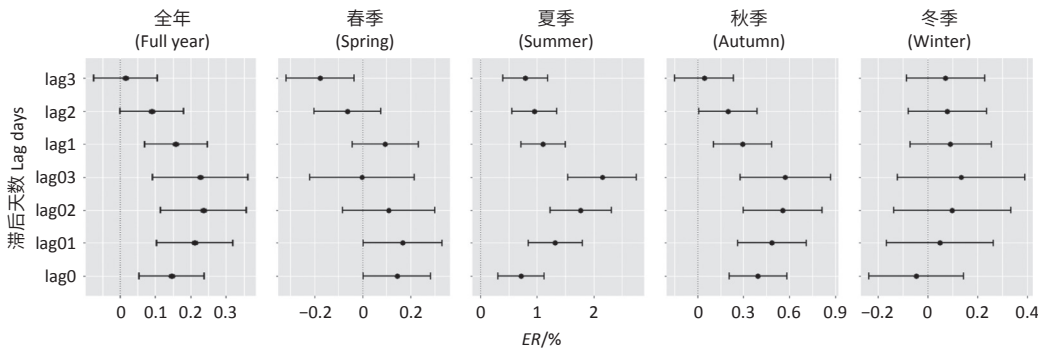


图2 不同季节和滞后天数PM<sub>10</sub>浓度每增加10 µg·m<sup>-3</sup>致非意外死亡的超额危险度[ER(95%CI)]/%

Figure 2 Season-specific excess risks of non-accidental mortality with per 10 µg·m<sup>-3</sup> increase in PM<sub>10</sub> at different lag days [ER (95%CI)]/%

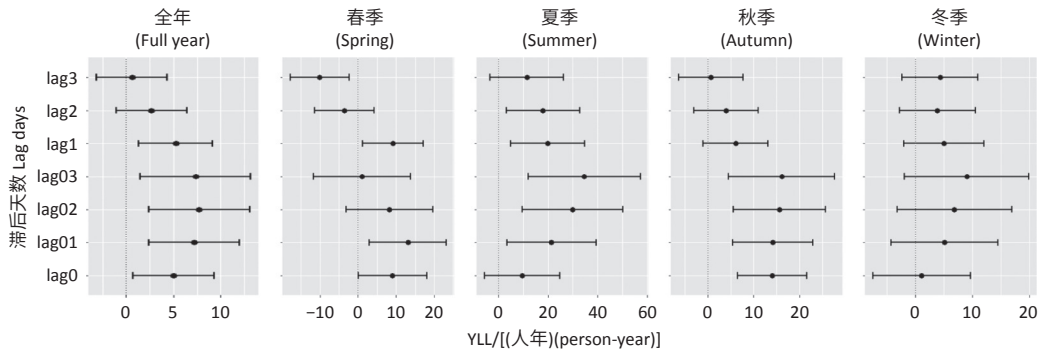


图3 不同季节和滞后天数PM<sub>2.5</sub>浓度每增加10 µg·m<sup>-3</sup>对非意外死亡寿命损失年的影响[YLL (95%CI)]/(人年)

Figure 3 Season-specific increment of non-accidental YLL with per 10 µg·m<sup>-3</sup> increase in PM<sub>2.5</sub> at different lag days [YLL (95%CI)]/(person-year)

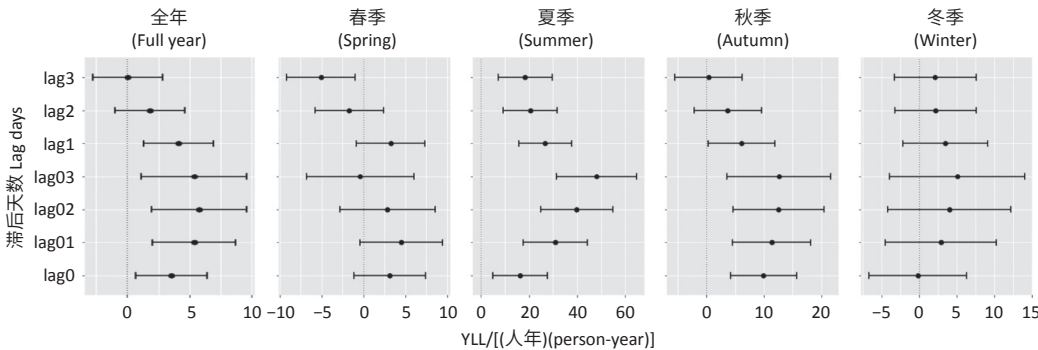


图4 不同季节和滞后天数PM<sub>10</sub>浓度每增加10 µg·m<sup>-3</sup>对非意外死亡寿命损失年的影响[YLL (95%CI)]/(人年)

Figure 4 Season-specific increment of non-accidental YLL with per 10 µg·m<sup>-3</sup> increase in PM<sub>10</sub> at different lag days [YLL (95%CI)]/(person-year)

表2 不同季节条件下平均每日由 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 暴露导致的非意外超额死亡人数和超额 YLLTable 2 Daily average excess deaths and YLL of non-accidental mortality due to PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> exposure in different seasons

| 颗粒物<br>Particulate matter | 季节 (Season)    | 中国环境空气质量标准<br>Chinese National Ambient Air Quality Standards |   | 全球空气质量指南(2021)<br>Global Air Quality Guidelines (2021) |   |
|---------------------------|----------------|--|---|--|---|
|                           |                | 超额死亡人数(95%CI)<br>Excess deaths (95%CI)                       | 超额YLL(95%CI)/(人年)<br>Excess YLL (95%CI)/(person-year) | 超额死亡人数(95%CI)<br>Excess deaths (95%CI)                 | 超额YLL(95%CI)/(人年)<br>Excess YLL (95%CI)/(person-year) |
| PM <sub>2.5</sub>         | 全年 (Full year) | 0.59(0.53~0.66)  | 11.59(10.39~12.79)                                    | 2.03(1.94~2.12)  | 39.29(37.66~40.93)                                    |
|                           | 春季 (Spring)    | 0.70(0.55~0.84)  | 15.34(12.36~18.31)                                    | 3.08(2.86~3.31)  | 66.36(61.92~70.8)                                     |
|                           | 夏季 (Summer)    | 0.28(0.20~0.37)  | 6.65(4.59~8.71)                                       | 5.38(5.08~5.69)  | 112.23(105.79~118.67)                                 |
|                           | 秋季 (Autumn)    | 1.36(1.08~1.63)  | 23.16(18.63~27.7)                                     | 4.74(4.33~5.16)  | 78.67(72.09~85.25)                                    |
| PM <sub>10</sub>          | 全年 (Full year) | 0.42(0.36~0.47)  | 7.34(6.33~8.35)                                       | 2.09(1.99~2.19)  | 35.61(33.98~37.25)                                    |
|                           | 春季 (Spring)    | 0.34(0.25~0.44)  | —   | 1.81(1.66~1.95)  | —   |
|                           | 夏季 (Summer)    | 0.11(0.04~0.18)  | 2.10(0.80~3.39)                                       | 8.62(7.95~9.28)  | 156.94(144.99~168.89)                                 |
|                           | 秋季 (Autumn)    | 0.69(0.48~0.9)   | 11.25(7.97~14.54)                                     | 4.33(3.92~4.74)  | 67.44(61.21~73.67)                                    |

[注] 中国环境空气质量标准(PM<sub>2.5</sub>: 75 μg·m<sup>-3</sup>; PM<sub>10</sub>: 150 μg·m<sup>-3</sup>); 全球空气质量指南(2021)(PM<sub>2.5</sub>: 15 μg·m<sup>-3</sup>; PM<sub>10</sub>: 45 μg·m<sup>-3</sup>)。冬季 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 对健康结局的影响均无统计学意义,因此该表不包括冬季;春季 PM<sub>10</sub> 对非意外 YLL 的影响也没有统计学意义,因此不计算其超额 YLL。上述数据均选择具有最大健康效应的滞后日进行计算。

[Note] Chinese National Ambient Air Quality Standards (PM<sub>2.5</sub>: 75 μg·m<sup>-3</sup>; PM<sub>10</sub>: 150 μg·m<sup>-3</sup>); Global Air Quality Guidelines (2021) (PM<sub>2.5</sub>: 15 μg·m<sup>-3</sup>; PM<sub>10</sub>: 45 μg·m<sup>-3</sup>). The associations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> with health outcomes are not significant in winter, so this table does not include winter. The effect of PM<sub>10</sub> on YLL is not significant in spring, so its excess YLL is not calculated. The above data are calculated by selecting the lag day with the maximum health effect.

### 3 讨论

大气颗粒物对健康具有不良影响,且这种健康影响可能存在季节性差异。本研究采用了分层分析和时间序列分析相结合的方法,评估了2014—2019年天津市不同季节 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 对每日非意外总死亡率及相应 YLL 的影响,并估计了不同季节条件下 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 暴露导致的非意外总死亡超额死亡人数和超额 YLL。研究结果显示 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 对每日非意外死亡率及相应 YLL 的影响均呈现明显的季节性差异,且这种健康影响的季节模式与 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的季节模式并不一致,表现为颗粒物的浓度“冬高夏低”,但其对非意外总死亡率及 YLL 的影响在夏季时最大,冬季时无统计学意义。这之前多项研究结果一致,如 Yi<sup>[9]</sup>、Peng<sup>[11]</sup>、Stafoggia<sup>[17]</sup>、Nawrot<sup>[18]</sup> 等的研究均证实夏季大气颗粒物对健康的不良影响更强,冬季时较弱。然而,也有一些研究报告了非常不一致季节模式。例如,我国复旦大学阚海东教授团队针对我国 17 个城市的分析结果显示,PM<sub>10</sub> 对死亡率的急性影响呈双峰模式,在夏季和冬季时最高<sup>[10]</sup>。Bell 等<sup>[8]</sup> 针对美国 202 个地区大气细颗粒物与每日住院人数之间的关系进行季节性分析显示,冬季时颗粒物对住院人数的影响最大。上海<sup>[12]</sup>、武汉<sup>[13]</sup>、台中<sup>[14]</sup> 等单一城市的研究结果也显示冬季时颗粒物对健康的影响最大。还有少数研究发现春季和秋季时颗粒物对健康的影响更高<sup>[15]</sup>。不同地区颗粒物的来源和成分、气体污染物及气象条件、当

地居民的暴露模式和社会经济水平等方面存在较大差异,这可能是造成上述结果不一致的部分原因。

天津市冬季大气颗粒物相关健康效应减小可能与冬季大气污染的暴露减少有关。天津市冬季寒冷需集中供暖,人们在室内的时间远大于室外且开窗通风的时间大大减少,进而导致大气污染的暴露减少。此外,Zauli-Sajani 等<sup>[19]</sup> 的研究发现冬季建筑物对颗粒物的渗透作用明显降低,这意味着与其他季节相比,冬季环境颗粒物浓度每增加一个单位,室内浓度就会增加更少。因此,在通过环境浓度来确定暴露量的流行病学研究中,冬季的单位风险往往会降低。夏季颗粒物相关健康效应的增强可能是因为夏季太阳辐射增加导致二氧化硫的氧化率增加,进而导致硫酸盐的生成增多<sup>[20-23]</sup>。大量的流行病学研究显示硫酸盐与死亡率之间相关<sup>[15,24]</sup>。颗粒物与高温之间的交互作用也可能是造成夏季颗粒物暴露相关健康风险增加的另一重要原因,暴露在夏季高温条件下可使大气颗粒物对健康产生不利影响的风险增加<sup>[25-27]</sup>。此外,由于大气污染物之间通常存在相关性,夏季颗粒物健康效应的增强可能有一部分来源于夏季臭氧健康效应的增强。夏季由于光化学反应的增强,臭氧的生成速率快,环境中臭氧的浓度升高对人群健康的影响增强<sup>[28-29]</sup>。

通常,大多数研究结果显示 PM<sub>2.5</sub> 的健康效应大于 PM<sub>10</sub>,而本研究发现夏季时 PM<sub>10</sub> 与健康结局之间的暴露-反应关系大于 PM<sub>2.5</sub>。Moolgavkar 等<sup>[30]</sup> 在做美

国两个城市的大气污染物对死亡率影响的季节性差异分析中也有同样的发现。该研究结果显示,全年洛杉矶地区  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度每增加  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 非意外死亡率分别增加 0.7% 和 0.6%, 而在进行季节性差异分析时显示夏季  $PM_{10}$  浓度每增加  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 非意外死亡率增加 1.8%, 而  $PM_{2.5}$  对非意外死亡率的影响无统计学意义。这可能是因为  $PM_{10}$  与高温之间的协同作用更为明显。

为了将不同季节大气颗粒物的浓度信息纳入考量, 本研究还分别计算了不同季节条件下, 超过某一浓度限值的大气颗粒物暴露导致的超额死亡人数和超额 YLL, 该结果更具有公共卫生学意义。结果显示: 以全球空气质量指南(2021)的限值为参考时, 夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露导致的超额死亡人数和超额 YLL 最大, 其次为秋季和春季; 而以中国环境空气质量标准得二级浓度限值为参考时,  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露导致的超额疾病负担在秋季时最大, 其次为春季, 最后为夏季。这主要是因为我国环境空气质量标准中  $PM_{2.5}$  的 24 h 浓度限值是  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $PM_{10}$  的 24 h 浓度限值为  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的日平均浓度为  $47.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $76.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 表示夏季绝大多数时候颗粒物的浓度都没有超过我国的空气污染浓度限值, 因此以我国空气质量标准为参考时, 夏季颗粒物暴露造成的疾病负担较少。而以全球空气质量指南为参考时, 夏季  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的平均浓度均超过其限值且夏季时颗粒物对健康的影响也最大, 因此在综合考虑健康效应和浓度的情况下, 夏季由  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露导致的超额疾病负担最重。该结果提示为提高居民的健康水平, 应该采取更为严格的环境空气质量标准, 并提示夏季时更应该注意大气颗粒物相关健康防护。

本研究也存在一定的局限性。第一, 本研究简单地将不同站点的监测结果取平均值, 作为个体大气颗粒物的暴露浓度, 由此产生的测量误差可能会低估大气颗粒物对人群健康的效应<sup>[31]</sup>。第二, 受数据可用性的限制, 未调整几个潜在因素的影响, 例如出行规律、生活方式等。先前的研究表明, 在评估环境空气中颗粒物污染对人类健康的不良影响时, 这些因素起着重要作用<sup>[32]</sup>。第三, 没有考虑其他主要气体污染物的混杂影响, 大气颗粒物对健康影响的季节性差异可能受其他气体污染物季节性变化的影响。第四, 本研究是在四季变化分明、大气颗粒物污染较严重的单个城市进行的, 因此仅能反映天津地区大气颗粒物对健康影响的季节性特征, 进一步的研究需要在更多气候条件

和大气颗粒物污染水平不同的国家或地区进行, 以便能够获得更为全面的流行病学证据。

综上, 本研究显示天津市大气颗粒物对健康的影响存在季节性差异。其中夏季的健康影响最大, 冬季的影响未见统计学意义; 但关于造成这种季节性差异的机制尚不明确, 需要进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] LI G, XUE M, ZENG Q, et al. Association between fine ambient particulate matter and daily total mortality: an analysis from 160 communities of China [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 599-600: 108-113.
- [3] SAMOLI E, ANALITIS A, TOULOUMI G, et al. Estimating the exposure-response relationships between particulate matter and mortality within the APHEA multicity project [J]. *Environ Health Perspect*, 2005, 113(1): 88-95.
- [4] KELLY FJ, FUSSELL JC. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter [J]. *Atmos Environ*, 2012, 60: 504-526.
- [5] PARK M, JOO HS, LEE K, et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 17007.
- [6] TIAN L, PAN X. The interactive effects between particulate matter and temperature on mortality in Beijing, China [J]. *Occup Environ Med*, 2018, 75(Suppl 1): A28.
- [7] WONG CM, YANG L, THACH T Q, et al. Modification by influenza on health effects of air pollution in Hong Kong [J]. *Environ Health Perspect*, 2009, 117(2): 248-253.
- [8] BELL ML, EBISU K, PENG RD, et al. Seasonal and regional short-term effects of fine particles on hospital admissions in 202 US counties, 1999-2005 [J]. *Am J Epidemiol*, 2008, 168(11): 1301-1310.
- [9] YI O, HONG YC, KIM H. Seasonal effect of  $PM_{10}$  concentrations on mortality and morbidity in Seoul, Korea: a temperature-matched case-crossover analysis [J]. *Environ Res*, 2010, 110(1): 89-95.
- [10] CHEN R, PENG RD, MENG X, et al. Seasonal variation in the acute effect of particulate air pollution on mortality in the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPEs) [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 450-451: 259-265.
- [11] PENG RD, DOMINICI F, PASTOR-BARRIUSO R, et al. Seasonal analyses of air pollution and mortality in 100 US cities [J]. *Am J Epidemiol*, 2005, 161(6): 585-594.
- [12] KAN H, LONDON SJ, 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 [J]. *Environ Health Perspect*, 2008, 116(9): 1183-1188.
- [13] QIAN Z, LIN HM, STEWART WF, et al. Seasonal pattern of the acute mortality effects of air pollution [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2010, 60(4): 481-488.
- [14] LIANG WM, WEI HY, KUO HW, et al. Association between daily mortality from respiratory and cardiovascular diseases and air pollution in

- Taiwan[J]. *Environ Res*, 2009, 109(1): 51-58.
- [15] UEDA K, YAMAGAMI M, IKEMORI F, et al. Associations between fine particulate matter components and daily mortality in Nagoya, Japan[J]. *J Epidemiol*, 2016, 26(5): 249-257.
- [16] CHRISTOPHER JL, MURRAY MD, ALAN D, et al. Measuring the global burden of disease[J]. *N Engl J Med*, 2013, 369(5): 448-457.
- [17] STAFOGGIA M, SCHWARTZ J, FORASTIERE F, et al. Does temperature modify the association between air pollution and mortality? A multicity case-crossover analysis in Italy[J]. *Am J Epidemiol*, 2008, 167(12): 1476-1485.
- [18] NAWROT TS, TORFS R, FIERENS F, et al. Stronger associations between daily mortality and fine particulate air pollution in summer than in winter: evidence from a heavily polluted region in western Europe[J]. *J Epidemiol Commun Health*, 2007, 61(2): 146-149.
- [19] ZAULI-SAJANI S, ROVELLI S, TRENTINI A, et al. Higher health effects of ambient particles during the warm season: The role of infiltration factors[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 627: 67-77.
- [20] YAN G, ZHANG P, YANG J, et al. Chemical characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in a petrochemical city: implications for primary and secondary carbonaceous component[J]. *J Environ Sci*, 2021, 103: 322-335.
- [21] WANG Q, LI J, YANG J, et al. Seasonal characterization of aerosol composition and sources in a polluted city in Central China[J]. *Chemosphere*, 2020, 258: 127310.
- [22] GONZÁLEZ LT, LONGORIA-RODRÍGUEZ GE, SÁNCHEZ-DOMÍNGUEZ M, et al. Seasonal variation and chemical composition of particulate matter: a study by XPS, ICP-AES and sequential microanalysis using Raman with SEM/EDS[J]. *J Environ Sci (China)*, 2018, 74: 32-49.
- [23] GALINDO N, NICOLÁS JF, YUBERO S, et al. Factors affecting levels of aerosol sulfate and nitrate on the Western Mediterranean coast[J]. *Atmos Res*, 2008, 88(3/4): 305-313.
- [24] MICHIKAWA T, YAMAZAKI S, UEDA K, et al. Effects of exposure to chemical components of fine particulate matter on mortality in Tokyo: a case-crossover study[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 755: 142489.
- [25] LI G, ZHOU M, CAI Y, et al. Does temperature enhance acute mortality effects of ambient particle pollution in Tianjin City, China[J]. *Sci Total Environ*, 2011, 409(10): 1811-1817.
- [26] ANALITIS A, DE DONATO F, SCORTICINI M, et al. Synergistic effects of ambient temperature and air pollution on health in Europe: results from the PHASE project[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15(9): 1856.
- [27] REN C, TONG S. Temperature modifies the health effects of particulate matter in Brisbane, Australia[J]. *Int J Biometeorol*, 2006, 51(2): 87-96.
- [28] LUONG LM T, PHUNG D, DANG TN, et al. Seasonal association between ambient ozone and hospital admission for respiratory diseases in Hanoi, Vietnam[J]. *PLoS One*, 2018, 13(9): e0203751.
- [29] 谷少华, 陆蓓蓓, 王钢, 等. 臭氧对心脑血管疾病急救的短期影响及其季节性差异[J]. *中国卫生统计*, 2019, 36(1): 52-56.
- GU SH, LU BB, WANG G, et al. Seasonal variation in the acute effect of ozone on emergency ambulance dispatches for cardiovascular diseases[J]. *Chin J Health Stat*, 2019, 36(1): 52-56.
- [30] MOOLGAVKAR SH. Air pollution and daily mortality in two U. S. counties: season-specific analyses and exposure-response relationships[J]. *Inhal Toxicol*, 2003, 15(9): 877-907.
- [31] 张标, 王锦香. 上海市崇明区大气污染物与医院门诊量关系的时间序列研究[J]. *环境与职业医学*, 2019, 36(4): 376-380.
- ZHANG B, WANG JX. Time-series study on relationship between air pollutants and outpatient visits in Chongming district of Shanghai[J]. *J Environ Occup Med*, 2019, 36(4): 376-380.
- [32] SARIGIANNIS DA, KARAKITSIOS SP, KERMENIDOU M, et al. Total exposure to airborne particulate matter in cities: the effect of biomass combustion[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 493: 795-805.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)

· 告知栏 ·

## 《环境与职业医学》出版伦理声明

《环境与职业医学》遵循出版道德委员会(Committee on Publication Ethics, COPE)的指导方针调查和处理不当行为的指控或怀疑。

对于作者: ①所投稿件必须是作者的原创作品, 之前不得以印刷或在线形式发表, 或同时投给其他出版物, 如文中使用先前发表的资料(如图、表格)需要提供相关的归属权和许可证明; ②作者应保证所投稿件不存在任何学术不端行为, 学术不端行为定义见 CY/T 174—2019《学术出版规范—期刊学术不端行为界定》; ③所有作者在投稿时需签署“利益冲突声明”, 声明是否存在实际或潜在的利益冲突。

对于编辑与审稿人: 编辑和审稿人必须公开任何实际或潜在的竞争性利益, 包括所有被合理视为与审稿有关的经济利益或非经济利益; 有关竞争性利益和其他道德问题的更详细信息, 请参阅 COPE 指导方针。

《环境与职业医学》编辑部

2022年6月25日