

# 气温与 PM<sub>2.5</sub> 协同作用对疾病急诊就诊人数的影响

张莹<sup>1\*</sup>, 王式功<sup>1</sup>, 贾旭伟<sup>2</sup>, 冯鑫媛<sup>1</sup>, 胡文东<sup>1</sup>, 杨柳<sup>1</sup>, 王嘉鑫<sup>1</sup>, 肖丹华<sup>1</sup>, 朱蓉<sup>1</sup> (1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 中国人民解放军 93544 部队, 河北 保定 072655)

**摘要:** 为评价气温和 PM<sub>2.5</sub> 协同作用对不同种类疾病急诊就诊人数的影响, 采用广义相加模型(GAMs)中的不分层模型、非参数二元响应模型和温度分层模型, 在控制了时间序列长期趋势、“星期几效应”、节假日效应和相对湿度等因素的影响后, 分析 2009–2011 年北京市 PM<sub>2.5</sub> 在不同气温条件下对相关疾病急诊就诊人数影响的暴露–反应关系。结果表明, 随着选取的气温分层临界值升高, PM<sub>2.5</sub> 在高温条件下的效应逐渐增强, 当临界值为 28℃ 时, 高温条件下的效应最显著, 此时 PM<sub>2.5</sub> 浓度每升高 10 μg/m<sup>3</sup>, 全急诊人数、呼吸系统和循环系统疾病急诊就诊人数的超额增加百分比分别为 0.15%(95%CI: 0.11%, 0.19%), 0.35% (95%CI: 0.26%, 0.44%) 和 0.34%(95%CI: 0.09%, 0.59%), 而 <28℃ 的条件下无统计学意义, 表明高温与 PM<sub>2.5</sub> 对人群健康的影响存在协同加强效应。

**关键词:** 气温; PM<sub>2.5</sub>; 协同作用; 广义相加模型

中图分类号: X503.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)08-3175-08

**Synergetic effect of mean temperature and PM<sub>2.5</sub> on emergency room visits for different diseases.** ZHANG Ying<sup>1\*</sup>, WANG Shi-gong<sup>1</sup>, JIA Xu-wei<sup>2</sup>, FENG Xin-yuan<sup>1</sup>, HU Wen-Dong<sup>1</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>, WANG Jia-xin<sup>1</sup>, XIAO Dan-hua<sup>1</sup>, ZHU Rong<sup>1</sup> (1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. People's Liberation Army 93544, Baoding 072655, China). *China Environmental Science*, 2017, 37(8): 3175~3182

**Abstract:** To quantitatively evaluate the synergetic effect of ambient temperature (AT) and PM<sub>2.5</sub> on different diseases' emergency room visits (ERVs) in Beijing. After considering some potential confounding factors, such as long term trend of time series, “day of week” effect, holiday effect, and relative humidity, the generalized additive models (GAMs) including non-stratification model, nonparametric bivariate response model and temperature-stratified parametric model, were used to analyze the exposure-effect relationship between PM<sub>2.5</sub> and ERVs in different temperature conditions from 2009 to 2011 in Beijing. The results showed that, the health effect of PM<sub>2.5</sub> significantly enhanced under higher temperature with the temperature stratification critical value increasing. The exposure-response relationship between PM<sub>2.5</sub> and ERVs appeared most significant when 28℃ was chosen as a critical value. The effect estimates per 10 μg/m<sup>3</sup> increase in PM<sub>2.5</sub> corresponding to 0.15% (95% confidence interval (CI): 0.11%, 0.19%), 0.35% (95%CI: 0.26%, 0.44%) and 0.34% (95%CI: 0.09%, 0.59%) increase of total, respiratory and cardiovascular ERVs on high temperature (>28℃), respectively. However, there was no statistical significance when the temperature was less than 28℃. It means that there was a synergistic strengthening effect of high temperature and PM<sub>2.5</sub> on public health in Beijing.

**Key words:** ambient temperature; PM<sub>2.5</sub>; the synergistic effect; the generalized additive models

近年来, 主要由细颗粒物引发的雾霾天气发生频次明显增多, 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)对人群健康的影响也成为了现阶段研究的热点问题之一。已有的研究表明, 颗粒物尤其是细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 可损害呼吸系统、破坏免疫系统, 诱发呼吸系统和心脑血管等疾病, 从而增加其发病率和死亡率<sup>[1-5]</sup>。

与此同时, 近年来在全球气候异常变化、极

端天气气候事件发生频率明显增多的大背景下, 天气气候因素的异常变化对人类健康的影响也

收稿日期: 2017-01-12

基金项目: 上海市气象与环境重点实验室开放基金课题(QXJK201601); 国家重点研发计划(2016YFA0602004); 国家自然科学基金(91644226); 国家人口健康科学数据共享平台(2005PKA32400)。

\* 责任作者, 讲师, zhangy881208@126.com

渐趋凸显.大量研究表明,气温是影响人体健康最重要的因素之一,且气温和人群发病或者死亡的关系呈现“J”型、“V”型或“U”型分布特征,即在温度相对适宜的情况下发病或者死亡人数最少,但气温过高或过低,均会导致发病/死亡人数的增加<sup>[6-10]</sup>.

国内已有相关气温及污染物流行病学的个案报告<sup>[4,8]</sup>.这些研究采用了与国际接轨的研究方法,探明了污染物、气温变化分别对人体健康的不良影响及损伤.但以往的这些研究中,仅仅侧重于气温或污染物某一个方面,例如,研究气温对人体健康的影响时,往往把污染物作为混杂因素加以排除;而在研究污染物对人体健康的影响时,又往往把气温作为混杂因素来考虑.事实上,对相关人群健康的影响结果中应该是包含了污染物和气象条件两方面的共同作用,任何一种所谓的排除混杂因素的数学处理,都具有一定的片面性;另一方面,虽然造成大气污染的根本原因是污染物的过量排放,但重污染事件的发生却往往是由不利于污染物扩散的气象条件造成的,也就是说重空气污染物及其对人群健康的危害并不是孤立存在的,而是在特定的气象条件下发生的<sup>[11]</sup>.因此,必须将污染物和气象要素两方面加以综合考虑为宜.对相关人群健康的影响结果中应该是包含了污染物和气象条件两方面的共同作用,任何一种所谓的排除混杂因素的数学处理,都具有一定的片面性.现阶段,国外在该方面已经做了相关研究,发现大气污染和气温对人群健康的影响存在协同作用<sup>[12-14]</sup>.然而国内关于该方面的研究还鲜有报道.基于此,本研究采用近年国际上通用的危险度评价方法—基于时间序列的广义相加模型(GAMs),以急诊数据为暴露效应指标,选取人口密度大、颗粒物污染重的北京市作为代表,旨在定量评价北京市气温和  $\text{PM}_{2.5}$  协同作用对相关疾病急诊就诊人数的影响.

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

#### 1.1.1 所用疾病资料数据 采用整群抽样方法

抽取北京市某 3 家三级甲等综合医院急诊科病历记录,包括 2009 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日逐日门诊资料,根据国际疾病分类标准第 10 版(ICD-10)<sup>[15]</sup>,对病例资料进行分类整理,收集门诊数据(ICD10: A00-R99)共计 895833 例,其中呼吸系统疾病(ICD-10 编码: J00-J99)病例资料 246872 例;循环系统疾病(ICD-10 编码: I00-I99)病例资料 52203 例.本文收集门诊病历信息主要包括就诊科室、就诊 ID 号、就诊日期、疾病诊断和家庭住址等信息.根据患者家庭住址信息剔除非北京市居住的人群资料,以确保研究对象均来自当地的常居人口.

**1.1.2 大气环境监测资料** 本研究所用污染数据主要为 2009 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日  $\text{PM}_{2.5}$  的日均浓度值,来源于北京市环保公众网(<http://www.bjee.org.cn/cn/index.php>),经检查数据完整无缺测.

**1.1.3 气象资料来源** 气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网中中国地面气象资料北京市 2009 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日的日均气象资料,包括日均气温( $^{\circ}\text{C}$ )、相对湿度(%)和平均风速( $\text{m/s}$ )等.

### 1.2 统计分析

所用到的软件主要包括 SQLserver2014 和 R3.1.4 统计软件,其中数据库软件 SQLserver2014 用于对原始病例数据进行统计分类;用 R 软件中的“mgcv”软件包对数据进行建模和定量分析.

GAMs 是对广义线性(GLM)的非参数推广,与 GLM 模型相比,GAMs 模型并非一个事先设定的模型,该模型由所使用的数据驱动,因此,模型结构是由研究时所采用数据的内在联系决定的,更能反映变量的期望与解释变量之间的本质关系,并且对数据要求较少,模型可应用不同函数拟合非线性关系变量,而后以加和形式引入模型<sup>[16]</sup>.正是基于 GAMs 模型一系列的优点,其目前已成为大气污染环境流行病学研究的标准方法.相对于总人群而言,每日急诊就诊人数属于小概率事件,其实际分布一般可认为近似于 Poisson 分布,因此,本文选择拟合 Poisson 回归的 GAMs 模型.据报道,北京市 85%的大气污染是由颗粒物,

尤其是细颗粒物引起的,考虑到细颗粒物(主要是 PM<sub>2.5</sub>)已成为北京市的首要污染物,并且 PM<sub>2.5</sub> 与其他气态污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO 和 O<sub>3</sub>)有很强的关联性<sup>[6-7]</sup>,基于此,在后续的研究中,本研究只拟合单污染物模型。

在探讨 PM<sub>2.5</sub> 与气温对人群健康影响的协同效应之前,首先来研究日均气温变化对不同种类疾病急诊就诊的影响。以呼吸系统疾病为例建模,如式(1)所示,即以呼吸系统疾病日急诊就诊人数为响应变量,控制时间的长期趋势、节假日效应、星期几效应、相对湿度和 PM<sub>2.5</sub> 的影响后,研究气温变化与疾病急诊就诊人数的关系,基本模型为:

$$\begin{aligned} \log[E(Y_t|X)] = & s(\text{time}, \text{bs} = \text{"cr"}, 21) + \text{as.factor}(\text{DOW}) + \\ & \text{as.factor}(\text{Holiday}) + s(\text{RH}, \text{bs} = \text{"cr"}, 3) + s(\text{Wind}, \\ & \text{bs} = \text{"cr"}, 3) + s(T, \text{bs} = \text{"cr"}, 3) + \text{PM}_{2.5} + \alpha = \\ & s(T, \text{bs} = \text{"cr"}, 3) + \text{PM}_{2.5} + \text{COVs} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $Y_t$  为第  $t$  日的急诊就诊人数;  $E(Y_t|X)$  为第  $t$  日急诊就诊人数的期望值; DOW 为星期哑变量(DOW, DOW=1~7); Holiday 为节假日效应哑变量(节假日为 1, 其他为 0);  $\alpha$  为残差; 本研究采用样条平滑函数  $s()$  拟合非线性自变量, 包括时间(time, time=1, 2, ..., 1095)、相对湿度(RH)和气温( $T$ )。根据相关文献<sup>[7]</sup>和 AIC 值确定参数自由度, time 自由度为 7/a,  $T$  和 RH 的自由度为 3, PM<sub>2.5</sub> 选取复合滞后一天(lag01, 研究日当天与前一天污染物浓度的平均值)的浓度<sup>[9]</sup>。

第二步, 分析平均气温与 PM<sub>2.5</sub> 协同作用对相关疾病急诊就诊的影响。首先, 建立不分层模型(nonstratification model), 探讨在不同的滞后时间条件下(分别选取当天 lag0, 单滞后一天 lag1, 单滞后两天 lag2 和复合滞后一天 lag01), 平均气温和 PM<sub>2.5</sub> 的协同作用对相关疾病急诊就诊的影响是否具有统计学意义, 检验效力为  $P < 0.05$ 。

$$\log[E(Y_t)] = \beta_1 \text{PM}_{2.5} + \beta_2 \text{temp} + \beta_3 (\text{PM}_{2.5} : \text{temp}) + \text{COVs} \quad (2)$$

式中:  $\beta_1$  为 PM<sub>2.5</sub> 对疾病影响效应对应的回归系数;  $\beta_2$  为气温变化对疾病影响效应的回归系数;  $\beta_3$  为 PM<sub>2.5</sub> 和气温共同作用对应的回归系数。

在上述研究的基础上, 建立非参数二元响应模型(nonparametric bivariate response model), 并拟合平均气温与 PM<sub>2.5</sub> 协同作用对相关疾病影响的三维立体图, 通过描述平均气温和 PM<sub>2.5</sub> 对相关疾病作用的空间分布特征, 直观观察二者协同作用对不同疾病的影响。

$$\log[E(Y_t|X)] = TS(T, \text{PM}_{2.5}) + \text{COVs} \quad (3)$$

式中:  $TS()$  为薄板样条函数, COVs 同模型(1)中。

第三步, 建立基于气温的分层模型(temperature-stratified parametric model)。根据相关文献<sup>[12]</sup>和拟合的气温与疾病暴露反应关系曲线图, 来选取温度分层的临界值(阈值), 从而探讨在不同温度分层条件下, PM<sub>2.5</sub> 对不同疾病急诊就诊人数的影响是否有统计学意义, 进而定量评价气温和 PM<sub>2.5</sub> 对疾病影响的协同效应。

根据 GAM 模型估算出的回归系数  $\beta$  和标准误差(SE: Standard Error), 从而对污染物的健康效应做出定量评价。当污染物浓度增加  $\Delta c$  时, 相关疾病门诊人数超额增加百分比(ER%)及其 95% 置信区间(95%CI)的计算公式, 参见式(4~5):

$$\text{ER}\% = (\exp(\Delta c \cdot \beta) - 1) 100\% \quad (4)$$

$$\text{ER}\%(95\% \text{CI}) = [\exp(\Delta c \cdot (\beta \pm 1.95 \text{SE})) - 1] 100\% \quad (5)$$

## 2 结果

### 2.1 急诊就诊人数与气象环境要素的描述性统计

由表 1 可以看出, 2009 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日总急诊人数、呼吸系统疾病和循环系统疾病平均每天门诊人数分别为 818.1 例、225.5 例和 47.7 例, 其中呼吸系统和循环系统疾病分别占总发病人数的 27.56% 和 5.83%。北京属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温为 13.15℃, 相对湿度为 50.43%。研究时段内, 北京市主要大气污染物 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度为 67.89 μg/m<sup>3</sup> (表 1), 已经明显超出了国家 GB3095-2012 标准中规定的二级空气质量标准(PM<sub>2.5</sub> 年均浓度二级标准为 35 μg/m<sup>3</sup>)<sup>[17]</sup>。其中研究时段内(1095d), PM<sub>2.5</sub> 超标天数为 815d(74.42%), 这与以往<sup>[18]</sup>的统计结果一致, 表明细颗粒物已成为北京市首要污染物。

表 1 2009~2011 年北京市急诊就诊人数、空气污染物及气象因素描述性分析

Table 1 Descriptive statistics on hospital ERVs outcomes, air pollution levels and meteorological variables in Beijing, China, 2009~2011.

| 项 目                                    | 均值±标准差        | 最小值    | P25    | P50    | P75    | 最大值     |
|----------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 疾病数据                                   |               |        |        |        |        |         |
| 总急诊人数                                  | 818.11±150.06 | 431.00 | 719.00 | 817.00 | 913.00 | 1569.00 |
| 呼吸系统疾病人数                               | 225.50±89.80  | 70.00  | 169.00 | 208.00 | 255.00 | 882.00  |
| 循环系统疾病人数                               | 47.70±11.20   | 16.00  | 40.00  | 48.00  | 55.00  | 84.00   |
| 气象因素                                   |               |        |        |        |        |         |
| 平均气温(℃)                                | 13.15±11.54   | -12.50 | 1.80   | 14.80  | 24.20  | 34.50   |
| 相对湿度(%)                                | 50.43±19.80   | 9.00   | 33.00  | 51.00  | 67.40  | 92.10   |
| 平均风速(m/s)                              | 2.24±0.91     | 0.51   | 1.50   | 2.10   | 2.72   | 6.42    |
| 污染物                                    |               |        |        |        |        |         |
| PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> ) | 67.89±46.36   | 4.39   | 34.68  | 57.38  | 88.90  | 294.83  |

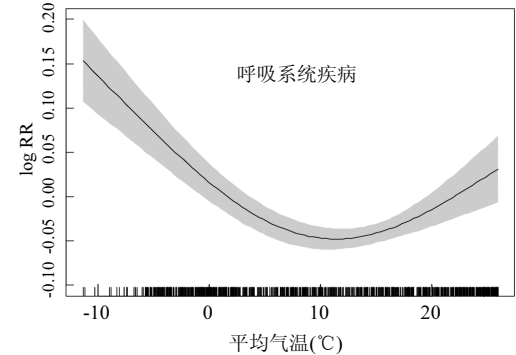
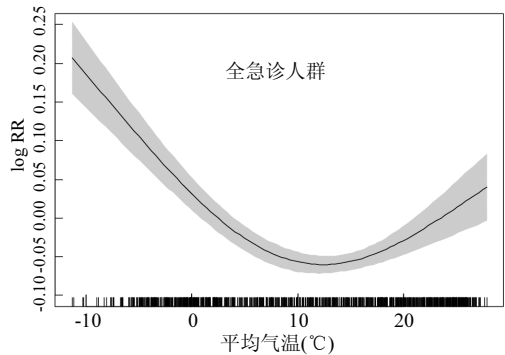
注:P25,P50和P75分别为第25、50、75百分位数.

2.2 气温与急诊就诊人数的暴露反应关系

在控制了时间趋势、星期几效应、节假日效应和空气污染效应的影响后,利用模型(1),分别拟合了气温与总急诊人数、呼吸系统和循环系统疾病急诊就诊人数的暴露反应关系(图 1).整体而言,平均气温与全急诊人数、呼吸系统疾病急诊就诊人数的暴露-反应关系均呈现近似“V”型分布特征;与循环系统疾病急诊就诊人数呈反“V”型分布特征.以呼吸系统疾病为例,从图上可以看出,最适温度在 12℃ 附近,此时,气温的效应最弱,发病人数最少,以 12℃ 为临界值(阈值),当气温高(低)于此阈值时,呼吸系统疾病日急诊就诊人数随着气温的升高(降低)而增加.同时还发现,除过呼吸系统疾病外,气温与全急诊人数和循环系统疾病暴露-反应关系的曲线转折点也均在 12℃ 附近.所以在后续温度分层研究中,把 12℃ 作为一个温度分层的临界值.

2.3 平均气温与PM<sub>2.5</sub>协同作用对不同疾病的影响

首先,采用不分层模型,检验在不同滞后条件下,平均气温与 PM<sub>2.5</sub> 交互作用分别对全急诊人数、呼吸系统和循环系统疾病急诊就诊人数的影响是否具有统计学意义( $P<0.05$ )(表 2).如果统计学意义存在,随后,采用非参数二元响应模型构建平均气温与 PM<sub>2.5</sub> 协同作用对不同疾病影响的空间分布图(图 2).表 2 为不分层情况下,不同滞后天数下气温与 PM<sub>2.5</sub> 协同作用的统计结果.由表 2 可见,气温与 PM<sub>2.5</sub> 对不同疾病的协同互效应( $\beta_3$ )存在差异,但在 lag01 的情况下,PM<sub>2.5</sub> 和气温的协同作用对不同疾病的影响均存在统计学意义,因此,在后续研究中,统一选取 lag01 的 PM<sub>2.5</sub> 作为研究对象.在上述研究的基础上,采用非参数二元响应模型构建平均气温与 PM<sub>2.5</sub> 协同作用对不同疾病作用的空间分布图(图 2).由图可见,对全急诊人数、呼吸系统和循环系统疾病而言,急诊就诊人数高峰均出现在高温-PM<sub>2.5</sub> 高浓度的情况下,这说明高温与 PM<sub>2.5</sub> 对人群健康的影响存在协同加强的效应.



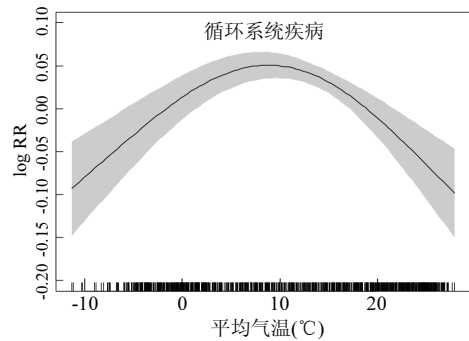


图1  2009~2011年北京市平均气温与不同疾病急诊就诊人数的暴露-反应关系(实线表示每日急诊人数估计均值增加百分比,阴影表示95%置信区间)

Fig.1  Dose-response association of mean temperature with different systems diseases ERVs in Beijing, China, 2009~2011. The solid lines indicate the estimated mean percentage of change in daily ERVs, and the shadow part indicate 95% confidence interval

表2  平均温度和 PM<sub>2.5</sub> 对北京市急诊就诊人数协同作用的相关系数<sup>a</sup>

| Table 2  Coefficients of the main and interactive effects of mean temperature and PM <sub>2.5</sub> on hospital ERVs in Beijing <sup>a</sup> |           |                    |                   |                   |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 疾病类别                                                                                                                                         | 系数        | lag0               | lag1              | lag2              | lag01             |
| 全急诊人数                                                                                                                                        | $\beta_1$ | -0.10(-0.36,0.15)  | 0.28(-0.15,0.71)  | -0.08(-0.47,0.31) | 0.12(-0.03,0.27)  |
|                                                                                                                                              | $\beta_2$ | 0.49(-0.05,1.03)   | -0.07(-0.24,0.10) | -0.04(-0.17,0.09) | 0.31(-0.28,0.90)  |
|                                                                                                                                              | $\beta_3$ | 0.85(0.34,1.35)*   | 0.23(0.07,0.39)*  | 0.41(0.07,0.75)*  | 0.22(0.09,0.34)*  |
| 呼吸系统疾病                                                                                                                                       | $\beta_1$ | 0.46(-0.10,1.02)   | 0.92(-0.25,2.09)  | 0.02(-0.02,0.06)  | -0.28(-0.70,0.14) |
|                                                                                                                                              | $\beta_2$ | -0.48(-1.37,0.41)  | -0.25(-0.81,0.31) | -0.28(-0.69,0.13) | -0.14(-0.35,0.07) |
|                                                                                                                                              | $\beta_3$ | 1.18(0.20,2.16)*   | -0.25(-1.10,0.60) | 1.42(0.77,2.06)*  | 0.86(0.65,1.07)*  |
| 循环系统疾病                                                                                                                                       | $\beta_1$ | 0.26(-0.01,0.54)   | 0.20(-0.05,0.46)  | 0.19(-0.07,0.44)  | 0.43(-0.16,1.02)  |
|                                                                                                                                              | $\beta_2$ | 0.05(-1.50,1.61)   | 1.37(-1.65,4.39)  | 2.10(-0.96,5.17)  | 0.24(-0.04,0.52)  |
|                                                                                                                                              | $\beta_3$ | -0.04(-0.06,-0.02) | 0.03(0.02,0.04)*  | 0.03(0.01,0.05)*  | 0.04(0.02,0.06)*  |

注:\*  $P < 0.05$ ; <sup>a</sup>给所有系数乘以1000;lag0:当天; lag1:急诊就诊的前一天; lag2:急诊就诊的前两天; lag01:急诊就诊当天与前一天的两天平均值.

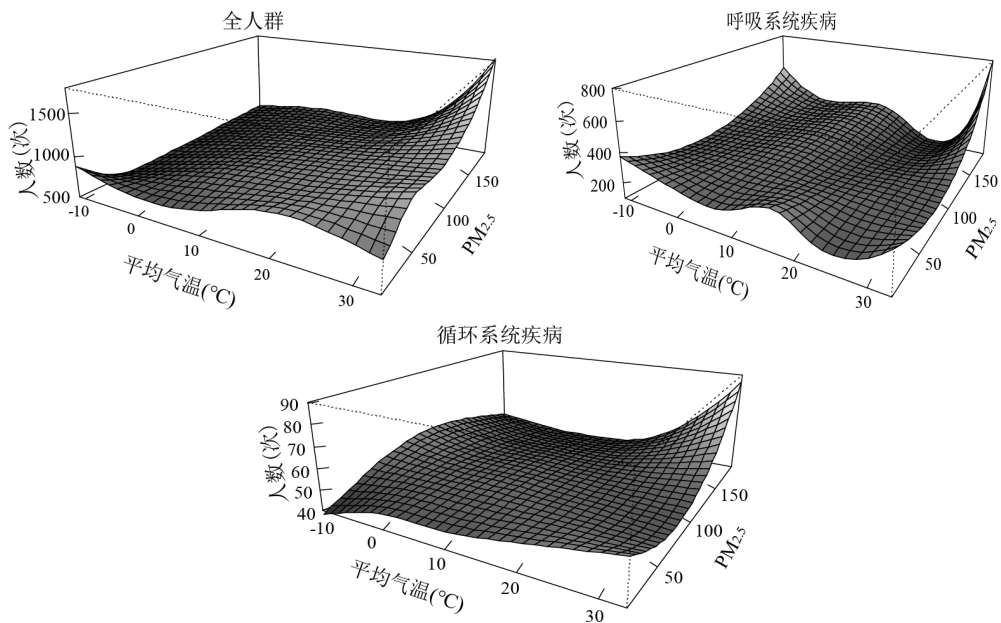


图2  2009~2011年北京市日均气温与PM<sub>2.5</sub>协同作用对不同疾病急诊就诊人数影响的平滑曲面图

Fig.2  Bivariate response surfaces of PM<sub>2.5</sub> and temperature for different health outcomes in Beijing, China, 2009~2011

2.4 不同温度分层水平下 PM<sub>2.5</sub> 对不同疾病的影响

表3 不同温度水平下 PM<sub>2.5</sub> 浓度每增加 10μg/m<sup>3</sup> 对不同疾病急诊就诊影响的超额增加百分比及 95% 的置信区间 (95%CI)

Table 3 The estimates of mean percentage of change (95%CI) in daily ERVs per 10μg/m<sup>3</sup> increase in PM<sub>2.5</sub> concentration across temperature levels using different cut-offs.

| Cut-off | T    | 全急诊人数<br>(95%CI)  | 呼吸系统疾病<br>(95%CI)  | 循环系统疾病<br>(95%CI)  |
|---------|------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 12.0℃   | High | 0.06(0.04,0.09)*  | 0.08(0.01,0.16)*   | 0.03(-0.02,0.08)   |
|         | Low  | 0.05(0.06,0.04)*  | 0.08(0.06,0.10)*   | 0.11(-0.03,0.26)   |
| 14.8℃   | High | 0.06(0.04, 0.07)* | 0.05(0.02, 0.08)*  | -0.06(-0.12, 0.00) |
|         | Low  | 0.03(0.04, 0.02)* | 0.06(0.04,0.08)*   | 0.01(-0.02, 0.04)  |
| 24℃     | High | 0.07(0.05, 0.10)* | 0.15(0.08, 0.22)*  | -0.07(-0.19,0.06)  |
|         | Low  | 0.06(-0.03, 0.15) | 0.03(-0.01, 0.07)  | 0.01(-0.03, 0.05)  |
| 26℃     | High | 0.12(0.06, 0.18)* | 0.15(0.06, 0.24)*  | -0.07(-0.20, 0.06) |
|         | Low  | 0.04(-0.05, 0.13) | -0.01(-0.02, 0.00) | 0.01(-0.02, 0.05)  |
| 28℃     | High | 0.15(0.11, 0.19)* | 0.35(0.26, 0.44)*  | 0.34(0.09, 0.59)*  |
|         | Low  | 0.05(-0.01, 0.11) | 0.04(-0.01, 0.09)  | 0.01(-0.03, 0.04)  |

注:\* P < 0.05.

表3给出了在不同温度分层水平下,PM<sub>2.5</sub> 浓度变化对不同疾病急诊就诊人数的影响.目前关于分层温度临界值的选取尚无统一方法,Ren 等<sup>[12]</sup>根据气温-死亡暴露反应关系曲线拟合图来选取临界值,Li 等<sup>[11]</sup>选取研究时段温度的中位数作为临界值,此外 Li 等<sup>[19]</sup>还通过 AIC 最小准则来选取临界值.综合前人的研究结果,在本文中,分别选取图 1 的温度阈值 12℃和研究时段日均气温的中位数 14.8℃作为临界值,同时还考虑到一般情况下人体在 24℃左右感觉最舒适,不同区域最佳舒适度阈值不尽相同,基于此,还依次选取了 24℃、26℃和 28℃作为临界值.在不同阈值情况下,分别分析在相对高温段(>阈值温度)和相对低温段(<阈值温度),PM<sub>2.5</sub> 浓度变化对不同种类疾病的影响(表3).由表3可见,随着选取的分层阈值温度的升高,PM<sub>2.5</sub> 对不同疾病影响的差异较大,其中对全急诊人数和呼吸系统疾病而言,当临界温度选为 12℃和 14.8℃时,相对高温段和相对低温段均有统计学意义(P<0.05),但随着选取的

临界温度进一步升高,高温效应更加显著且有统计学意义(P<0.05),而相对低温效应无统计学意义;对于循环系统疾病而言,当临界温度为 28℃时,高温效应有统计学意义(P<0.05),其他温度段均无统计学意义,表明高温可以进一步加剧 PM<sub>2.5</sub> 对人群健康的不利影响.

3 讨论

以往国内在研究污染物、气温对相关疾病不利影响方面,关于气温、污染物单独变化对相关疾病发病率/死亡率的研究较多<sup>[2,10]</sup>,而关于气温与污染物协同作用对相关敏感性疾病的影响还不多见.然而污染物及其对人群健康的危害并不是孤立存在的,往往是在特定的气象条件下发生的,因此,有必要开展污染物与气温协同作用对人群健康影响的相关研究.基于此,本文尝试性开展了北京市 2009~2011 年 PM<sub>2.5</sub> 与气温协同作用对相关疾病急诊就诊人数的影响研究,结果表明,平均气温与不同种类疾病急诊就诊人数的暴露-反应关系分布差异较大,与总急诊人群和呼吸系统疾病的暴露-反应关系呈近似“V”型分布特征;与循环系统疾病关系呈反“V”型分布特征.同时还发现当温度和污染物共同作用于人群健康,当分层阈值温度取 28℃时,相对高温条件下(>28℃),PM<sub>2.5</sub> 每增加 10μg/m<sup>3</sup>,全急诊人数、呼吸系统和循环系统疾病急诊就诊人数对应的超额增加百分比分别为 0.15%、0.35%和 0.34%,均有统计学意义(P<0.05),表明 PM<sub>2.5</sub> 与高温对人群健康的影响存在协同作用.

国外已经开展了相关气温和大气污染物协同作用对疾病发病率/死亡率影响方面的流行病学研究<sup>[21-23]</sup>.Stafoggia 等<sup>[20]</sup>对 1997~2004 年意大利 9 个城市平均气温与污染物的研究发现,夏季 PM<sub>10</sub> 浓度每增加 10μg/m<sup>3</sup>,全人群死亡率为 2.54% (95%CI: 1.31%~3.78%),冬季无统计学意义,研究表明高温进一步加剧了颗粒物对人群健康的不利影响.Ren 等<sup>[21]</sup>对布里斯班市气温与 PM<sub>10</sub> 协同作用的研究结果显示,在高温条件下(平均气温>26℃),PM<sub>10</sub> 每增加 10μg/m<sup>3</sup> 呼吸系统疾病死亡率的超额百分比为 4%(95%CI:1.43%,

6.63%),而在低温条件下无统计学意义.该学者亦研究了 1987~2000 年美国 60 个东部城市温度对  $\text{O}_3$ -死亡影响的调节作用,结果表明高温可以调节  $\text{O}_3$  对死亡的风险,并且表现出一定的区域差异<sup>[22]</sup>.本研究结果与上述国外的相关研究较为类似,也发现高温可以加剧  $\text{PM}_{2.5}$  对人群健康的不利影响.现阶段,虽然国外已经开展了污染物与气温协同作用对人群健康不利影响的相关研究,但其影响机制尚不清楚.而国内该方面相关研究刚刚起步,研究方法尚不统一.李沛<sup>[23]</sup>分季节研究了 2005~2009 年北京市  $\text{PM}_{2.5}$  对相关疾病死亡人数的影响,发现不同季节污染物对疾病死亡率的影响效果存在差异,其中冬季尤为显著,这也从侧面印证了污染物与低温对相关疾病死亡率的影响存在协同效应.而本研究在借鉴前人温度分层临界点选取方法的基础上,通过温度分层的方式尝试性地开展了不同温度条件下 2009~2011 年北京市污染物与气温共同作用对该地区相关疾病急诊就诊人数的影响研究,发现平均气温  $>28^\circ\text{C}$  情况下,气温与污染物对相关疾病急诊就诊人数的影响存在协同作用.虽然气温和污染物对人群死亡率和发病率的影响存在一定的偏差,研究条件也不一致,本研究侧重于相对温度较高情况下污染物对人群健康影响的研究,尚未开展低温条件下的相关研究.但不可否认,已有的研究均发现了气温与污染物对人群健康的影响存在协同作用,因此,在今后的研究中,考虑污染物与气温协同作用对人群健康的影响较为适宜.潘小川等<sup>[24]</sup>也指出:我国大气污染的发生是长期大气污染排放增加与短期气象条件变化共同作用下促发的,其对人群健康的影响也体现出长期慢性影响和短期急性危害共存、污染和气象因素交互作用的复杂特点,其中仍有很多未知的科学问题值得今后密切关注,需要我们今后不断的深入研究和探索.

另外,现阶段,关于温度分层临界值的选取,尚未有统一的选取标准.Li 等<sup>[11]</sup>选取了气温对死亡人数影响的暴露-反应关系曲线的最低点和平均气温中位数作为温度分层的两个临界值.Meng 等<sup>[12]</sup>选取了 25 和 75 的气温百分位数作为

温度分层的两个临界值.Ren 等<sup>[13]</sup>分别选取了  $23^\circ\text{C}$ 、 $24^\circ\text{C}$ 、 $26^\circ\text{C}$  和  $27^\circ\text{C}$  作为温度分层临界值.虽然临界值的选取方式不尽相同,但研究结果均表明高温与颗粒物共同作用对人群健康的不良影响起到协同加强的效应.综合前人的研究成果,本研究选取了气温对急诊就诊人数影响的暴露-反应关系曲线的临界值( $12^\circ\text{C}$ )、温度中位数( $14.8^\circ\text{C}$ )、人体舒适度临界值  $24^\circ\text{C}$  以及  $26^\circ\text{C}$  和  $28^\circ\text{C}$  分别作为临界值.结果也证实了北京市高温与颗粒物对人群健康相关的影响存在协同效应.

本研究选择北京市不同种类的急诊就诊人次作为  $\text{PM}_{2.5}$  和气温交互作用对于相关系统疾病影响的效应指标,优点和局限性并存.其优点是北京市作为我国人口密度高、污染重的典型代表城市,颗粒物尤其是细颗粒物污染十分严重,研究该地区污染物与气温协同作用对疾病的影响具有典型代表性,可为其它城市(群)提供参考;另一方面与死亡资料相比,急诊人次的变化反映  $\text{PM}_{2.5}$  的急性效应更加敏感.局限性表现在该资料采用的暴露浓度为北京市平均浓度,未能准确反映个体暴露情况,可能造成一定的偏倚.

## 4 结论

4.1 2009~2011 年北京市不同种类疾病急诊就诊人数与同期气温拟合的暴露-反应关系曲线差异较大,其中,与总急诊人群和呼吸系统疾病急诊就诊人数的关系均呈现近似“V”型分布特征;与循环系统疾病急诊就诊人数的关系呈反“V”型分布特征.

4.2 随着选取的分层阈值温度的升高, $\text{PM}_{2.5}$  在高温条件下的效应逐渐增强,且有统计学意义( $P < 0.5$ ).当临界值为  $28^\circ\text{C}$  时,高温效应最显著,此时  $\text{PM}_{2.5}$  浓度每升高  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,全急诊人数、呼吸系统和循环系统疾病急诊就诊人数的超额增加百分比分别为 0.15%、0.35% 和 0.34%,均有统计学意义( $P < 0.05$ ),表明高温与  $\text{PM}_{2.5}$  对人群健康的影响存在协同加强效应.

## 参考文献:

- [1] Wehner B, Birmili W, Ditas F, et al. Relationships between sub

- micrometer particulate air pollution and air mass history in Beijing, China, 2004~2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2008,8(3):11321-11362.
- [2] 张莹,邵毅,王式功,等.北京市空气污染物对呼吸系统疾病门诊人数的影响[J]. *中国环境科学*, 2014,34(9):2401-2407.
- [3] Dominci F, Peng R D, Bell M L, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases [J]. *JAMA*, 2006,295(10):1127.
- [4] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.我国113个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. *中国环境科学*, 2010,30(3):410-415.
- [5] 陶燕,刘亚梦,米生权,等.大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. *环境科学学报*, 2014,34(3):592-597.
- [6] Chung J Y, Honda Y, Hong Y C, et al. Ambient temperature and mortality: an international study in four capital cities of East Asia [J]. *Sci Total Environ*, 2009,408(2):390-396.
- [7] 马盼,李若麟,乐满,等.气象环境要素对北京市消化系统疾病的影响[J]. *中国环境科学*, 2016,36(5):1589-1600.
- [8] Lin S, Luo M, Walker R J, et al. Extreme High Temperatures and Hospital Admissions for Respiratory and Cardiovascular Diseases [J]. *Epidemiology*, 2009,20(5):738-746.
- [9] Curriero F C, Heiner K S, Samet J M, et al. Temperature and mortality in 11 cities of the Eastern United States [J]. *American Journal of Epidemiology*, 2002,155(1):80-87.
- [10] Kan H D, Jia J, Chen B H. Temperature and daily mortality in Shanghai: A time-series study [J]. *Biomed Environ Sci*, 2003, 16(2):133-139.
- [11] Ebi K L, Exuzides K A, Lau E, et al. Weather changes associated with hospitalizations for cardiovascular diseases and stroke in California, 1983~1998 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2004,49(1):48-58.
- [12] Li G, Zhou M, Cai Y, et al. Does temperature enhance acute mortality effects of ambient particle pollution in Tianjin City, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011,409:1811-1817.
- [13] Meng X, Zhang Y, Zhao Z, et al. Temperature modifies the acute effect of particulate air pollution on mortality in eight Chinese cities [J]. *Science of the Total Environment*, 2012,435-436(7): 215-221.
- [14] Ren C, Tong S. Temperature modifies the health effects of particulate matter in Brisbane, Australia [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006,51(2):87-96.
- [15] 卫生部卫生统计信息中心,北京协和医院世界卫生组织疾病分类合作中心.国际疾病分类(ICD-10)应用指导手册[M]. 北京:中国协和医科大学出版社, 2001:411-435.
- [16] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models for medical research [J]. *Statistical Methods in Medical Research*, 1990,4: 187-196.
- [17] GB 3095-2012 国家环境空气质量标准[S].
- [18] Li P, Xin J, Wang Y, et al. Time-series analysis of mortality effects from airborne particulate matter size fractions in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2013,81(2):253-262.
- [19] Li G, Sun J, Jayasinghe R, et al. Temperature Modifies the Effects of Particulate Matter on Non-Accidental Mortality: A Comparative Study of Beijing, China and Brisbane, Australia [J]. *Public Health Research*, 2012,2(2):21-27.
- [20] 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]. *American Journal of Epidemiology*, 2008,167(12):1476-1485.
- [21] Ren C, Tong S. Temperature modifies the health effects of particulate matter in Brisbane, Australia [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006,51(2):87-96.
- [22] 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 [J]. *Environment International*, 2008,34(4):451-458.
- [23] 李沛.北京市大气颗粒物污染对人群健康的危害风险研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [24] 潘小川.关注中国大气灰霾(PM<sub>2.5</sub>)对人群健康影响的新常态[J]. *北京大学学报医学版*, 2015,47(3):377-379.
- 作者简介:** 张莹(1988-),女,陕西宝鸡人,讲师,博士,主要从气象环境与健康研究.发表论文10余篇.