

2020—2023年德州市低温与急救呼叫频次的关联及大气PM_{2.5}组分的修饰效应

孙淑凡¹, 钟毓², 赵琦¹, 曲一楠¹, 王骋³, 王冬梅²

(1. 山东大学齐鲁医学院公共卫生学院流行病学系, 山东 济南 250012;

2. 德州市疾病预防控制中心, 山东 德州 253016;

3. 山东大学医学融合与实践中心, 山东 济南 250012)

摘要:目的 探讨山东省德州市冷季低温暴露与急救呼叫频次的关联, 评估细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})及其组分对该关联的修饰效应, 为应对不良大气环境的健康风险提供依据。方法 收集德州市2020—2023年急救呼叫数据和同期气象数据, 采用嵌套分布滞后非线性模型(distributed lag non-linear models, DLNM)的广义加性模型(generalized additive model, GAM)分析冷季(11月至次年2月)低温暴露与急救呼叫频次的关联程度, 通过将PM_{2.5}及组分与气温建立乘积项探究其修饰效应。结果 2020—2023年冷季德州市总急救呼叫频次共150408次。研究期间日平均温度(1.52±6.23)℃, PM_{2.5}日平均质量浓度57.60±53.65 μg/m³。累积低温暴露与急救呼叫频次的关联曲线近似“U”型(滞后0~30 d), 极端低温暴露(-6.03℃)和中度低温暴露(-1.02℃)对应的急救呼叫相对风险(relative risk, RR)及95%CI分别为1.61(1.36~1.91)和1.40(1.27~1.54)。在极端低温暴露时, 黑碳和有机物可增加低温相关急救呼叫风险(P<0.05); 在中度低温暴露时, PM_{2.5}及其组分可增加低温相关急救呼叫风险(P<0.01)。结论 山东省德州市冷季低温暴露与急救呼叫频次增加显著相关, 高浓度PM_{2.5}及其组分可增强低温暴露-急救呼叫频次的关联强度。

关键词: 低温; PM_{2.5}组分; 修饰效应; 急救呼叫

中图分类号: R122 **文献标志码:** A

Association between low-temperature exposure and emergency call frequency in Dezhou City from 2020 to 2023: modification effect of ambient PM_{2.5} components

SUN Shufan¹, ZHONG Yu², ZHAO Qi¹, QU Yinan¹, WANG Cheng³, WANG Dongmei²

(1. Department of Epidemiology, School of Public Health, Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China;

2. Dezhou Center for Disease Control and Prevention, Dezhou 253016, Shandong, China;

3. Medical Integration and Practice Center, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China)

Abstract: Objective To investigate the association between low-temperature exposure and emergency call frequency during the cold season in Dezhou City, Shandong Province, China, and to evaluate the modification effects of fine particulate matter (PM_{2.5}) and its components on this relationship, with the aim of providing addressing health risks associated with adverse atmospheric environments. **Methods** Emergency call data and meteorological data from Dezhou City during 2020-2023 were collected. The impact of low-temperature exposure during the cold-season (November to next February) on emergency call frequency was assessed using a generalized additive model (GAM) with distributed lag non-linear models (DLNM). The modifying effects were explored by including interaction terms between tempera-

ture and PM_{2.5} and its components. **Results** A total of 150, 408 emergency calls were recorded during the cold season from 2020 to 2023 in Dezhou City. The daily average temperature during the study period was $(1.52\pm 6.23)^\circ\text{C}$, and the daily average concentrations of PM_{2.5} was $57.60\pm 53.65\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. The cumulative exposure-response curve between low-temperature exposure and emergency call frequency over 0-30 days displayed an approximate “U” shape. The relative risks (RR) and 95% confidence interval (CI) for emergency calls corresponding to extreme low-temperature exposure (-6.03°C) and moderate low-temperature exposure (-1.02°C) were 1.61 (1.36-1.91) and 1.40 (1.27-1.54), respectively. Under extreme low-temperature exposure, black carbon and organic matter significantly increased the low-temperature-related risk of emergency calls ($P<0.05$). Under moderate low-temperature exposure, PM_{2.5} and components significantly elevated the low-temperature-related risk of emergency calls ($P<0.01$). **Conclusion** Cold-season low-temperature exposure was positively associated with emergency call frequency in Dezhou City, Shandong Province. High concentrations of PM_{2.5} and its components exacerbated the strength of association.

Key words: Low temperature; Components of PM_{2.5}; Modifying effects; Emergency calls

近年来,气候变化引起大气环境温度波动加剧,非最适温度已成为全球疾病负担研究识别的主要环境危险因素之一^[1]。现有研究表明,低温暴露相关地疾病负担往往高于高温暴露^[2],提示人群对寒冷环境的适应能力仍然有限^[3]。此外,北极放大效应可能加剧极地冷空气南下,进而提升欧亚大陆寒潮发生的频率^[4]。因此,深入探讨低温暴露的健康风险具有重要的公共卫生意义。

在评估极端气温的健康影响时,急救呼叫作为一种对人群健康状况变化更为敏感的指标,相较于死亡和住院等滞后性较强的结局指标,能够更及时地反映极端气温暴露的健康风险。已有研究探讨了极端气温暴露对急救呼叫频次的影响,发现低温暴露较高温暴露对急救呼叫风险的影响更为显著^[5-7]。然而,此类研究的结论常受限于特定人群特征及当地环境条件的制约。此外,大气污染物,特别是冬季高浓度的细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})及其组分,已被证明对健康构成显著威胁^[8-9]。然而,PM_{2.5}及其组分在低温暴露与急救呼叫频次关联中的修饰作用尚缺乏研究。因此,有必要开展更多研究,以探索不同地区低温暴露与急救呼叫间的关联及PM_{2.5}及其组分的修饰作用,为优化区域急救资源部署提供更为精准的循证依据。

德州市位于华东平原腹地,冬季平均最低气温为 $(1.52\pm 6.23)^\circ\text{C}$,是山东省寒潮灾害的高发区域之一^[10]。作为京津冀大气污染传输通道(“2+26”城市群)上的工业城市,德州市冬季PM_{2.5}污染问题尤为突出^[11-12]。本研究以德州市为研究区域,采用嵌套分布滞后非线性模型(distributed lag non-linear models, DLNM)构建广义加性模型(generalized additive model, GAM),探讨冷季低温暴露对急救呼叫的影响,并分析PM_{2.5}及其组分的修饰效应,以

期为当地乃至华东平原城市建立适应气候变化的健康防护体系提供科学支撑。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2020年1月1日至2023年12月31日期间的急救呼叫数据来自德州市120急救调度指挥中心,包括患者性别、年龄、呼救时间、呼救地址、主诉和初步诊断,涵盖全市11个县市区。同期气象数据来自于中国气象数据网,包括每日平均气温($^\circ\text{C}$)和相对湿度(%),空间分辨率为 $0.0625^\circ\times 0.0625^\circ$ 。同期污染物数据来自于中国大气成分近实时追踪数据集(tracking air pollution in China, TAP)^[13-14],包括日均PM_{2.5}和硫酸盐(sulfate, SO_4^{2-})、硝酸盐(nitrate, NO_3^-)、铵盐(ammonium, NH_4^+)、有机物(organic matter, OM)和黑碳(black carbon, BC)五种组分的质量浓度,空间分辨率为 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$ 。参考既往研究^[15-16],以及研究期间的月平均气温,本研究将11月至次年的2月定义为冷季。冷季极端低温和中度低温分别定义为该时段温度分布的第2.5百分位数(-6.03°C)和第25百分位数(-1.02°C)。PM_{2.5}及组分质量浓度按研究期间分布的第25和75百分位数划分为低污染水平和高污染水平^[17]。

1.2 方法

1.2.1 模型建立

应用嵌套DLNM的GAM模型估计德州冷季日均气温对急救呼叫频次的影响。模型为

$$\text{Log E}(Y_t) = \alpha + \text{cb}(\theta_t, \text{lag} = 30) + \text{ns}(\text{time}, \text{df} = 4/\text{冷季}) + \text{DOW} + \text{Holiday},$$

其中, Y_t 为第 t 天的急救呼叫频次; $\text{cb}(\theta_t, \text{lag} = 30)$ 为日均气温的交叉基函数,用于拟合低温暴露的累

积效应与滞后效应, θ_t 为第 t 天的日均气温, lag 为滞后时间^[18](本研究将最长滞后时间设定为 30 d), 温度维度和滞后维度的自由度(degree of freedom, df)分别为 3 和 4; ns (time, df=4/冷季) 表示时间的自然立方样条, 用来控制长期趋势和季节性; DOW 和 Holiday 为分类变量, 分别用来控制星期几效应和节假日效应; α 为截距。

通过建立 $PM_{2.5}$ 及其组分与气温的交互项, 探究 $PM_{2.5}$ 及组分对低温-急救呼叫频次关联的修饰效应, 交互模型为

$\text{Log } E(Y_t) = \alpha + \text{ns}(\text{time}, \text{df}=4/\text{冷季}) + PM_{2.5} + \text{cb}(\theta_t, \text{lag}=30) \times PM_{2.5} + \text{DOW} + \text{Holiday}$,

其中, $PM_{2.5}$ 是年均暴露浓度的线性函数; $\text{cb}(\theta_t, \text{lag}=30) \times PM_{2.5}$ 是气温交叉基函数和 $PM_{2.5}$ 线性函数的交互项。分别计算 $PM_{2.5}$ 及组分在高和低水平时, 极端低温/中度低温与急诊呼叫频次的相对风险(relative risk, RR)。

1.2.2 敏感性分析

通过调整最大温度滞后时间为 33 和 35 d、滞后天数 df 为 5 以及将相对湿度以 df=3 的自然立方样条函数纳入模型来检验模型的稳健性。

1.3 统计学处理

采用 R 4.4.0 软件。计数资料用 $n(\%)$ 表示。

表 1 2020—2023 年德州冷季急救呼叫频次、气象因素和大气污染物分布情况

Table 1 Emergency calls, meteorological factors and air pollutants during the cold season in Dezhou City from 2020 to 2023

项目	数值	Min	$M(P_{25}, P_{75})$	Max
急救呼叫频次*	150 408(100%)	213	317(294, 343)	741
性别#				
男	78 500(52.19%)	100	167(153, 183)	363
女	68 287(45.40%)	98	143(131, 158)	350
年龄/岁&				
0~<34	22 587(15.02%)	21	48(42, 57)	127
34~65	56 439(37.52%)	76	124(112, 137)	176
>65	67 018(44.56%)	90	134(121, 151)	514
气象因素				
平均温度/°C	1.52±6.23	-8.98	1.52(-1.02, 5.21)	14.92
相对湿度/%	53.84±29.59	17.96	53.84(40.50, 70.09)	97.63
大气污染物/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
$PM_{2.5}$	57.60±53.65	3.00	57.60(32.00, 85.65)	236.50
SO_4^{2-}	9.60±10.94	0.56	9.60(4.37, 15.31)	55.62
NH_4^+	8.80±9.31	0.48	8.80(4.38, 13.68)	40.00
NO_3^-	14.32±15.80	0.59	14.32(7.13, 22.93)	65.79
BC	2.36±2.22	0.11	2.36(1.30, 3.51)	10.54
OM	10.90±10.44	0.57	10.90(6.46, 16.89)	47.18

注: * Min, $M(P_{25}, P_{75})$, Max 为日急救呼叫频次; # 3 621(2.41%) 例性别信息缺失; & 4 364(2.90%) 例年龄信息缺失。

2.2 冷季日均气温对急救呼叫频次的影响

冷季日均气温与急救呼叫频次的累积暴露-反

服从正态分布的计量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 不服从的用最小值(minimum, Min)、 $M(P_{25}, P_{75})$ 和最大值(maximum, Max)表示。采用基于点估计(effect estimate, E)和标准误(standard error, SE)的 z 检验^[19]评估不同程度低温作用的差异和不同污染水平修饰作用的差异是否具有统计学意义, 具体的公式为

$$z = (E_1 - E_2) / \sqrt{SE_1^2 + SE_2^2}$$

其中, E_1 、 E_2 是效应的点估计值, SE 是标准误。“dlnm”包和“mgcv”包分别用于拟合 DLNM 和 GAM 模型。检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 德州市气象因素、空气污染物和急救呼叫频次的描述性分析

2020—2023 年冷季期间德州居民总急救呼叫共 150 408 次, 其中男性占 52.19%; 0~34 岁占 15.02%, 34~65 岁占 37.52%, 65 岁以上占 44.56%; 研究期间的冷季日气温为 $(1.52 \pm 6.23)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(53.84 \pm 29.59)\%$ 。大气 $PM_{2.5}$ 日平均质量浓度为 $(57.60 \pm 53.65) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 见表 1。

应曲线呈“U”型(滞后 0~30 d)。以最适气温(8.30°C)为参照, 极端低温(-6.03°C)和中度低温

(-1.02 °C)下急救呼叫风险的累积 RR(95%CI) 分别为 1.61(1.36~1.91) 和 1.40(1.27~1.54); 极端低温的效应高于中度低温, 差异具有统计学意义($P < 0.05$)。见图 1A。

冷季低温的效应在滞后第 3 天出现, RR(95% CI) 为 1.02(1.01~1.04), 于滞后第 10 天时达到最高值, RR(95% CI) 为 1.05(1.03~1.06), 第 19~30 天时出现收获效应。见图 1B。

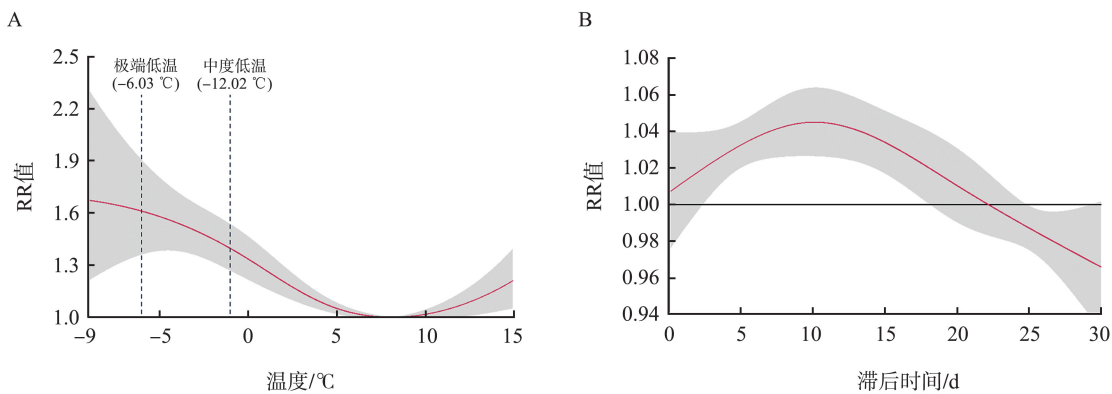


图 1 2020—2023 年德州低温对急救呼叫频次影响

A: 累积效应; B: 滞后效应。

Figure 1 Impact of low-temperature on emergency call frequency in Dezhou City from 2020 to 2023

A: Cumulative effect plot; B: Lag effect plot.

2.3 冷季 PM_{2.5}对低温-急救呼叫风险的修饰效应分析

PM_{2.5}的修饰效应分析结果显示, 高 PM_{2.5}质量浓度下的极端低温相关急救呼叫累积 RR(95%CI) 为 1.76(1.43~2.16), 在低 PM_{2.5}质量浓度时下降至 1.51(1.20~1.91), 但差异无统计学意义($P > 0.05$); 中度低温相关急救呼叫累积 RR(95% CI) 由高 PM_{2.5}质量浓度的 1.56(1.40~1.73), 下降至低 PM_{2.5}质量浓度的 1.16(1.04~1.30), 差异有统计学意义

($P < 0.01$), 见图 2A。

不同水平 PM_{2.5}修饰下的低温效应滞后结果显示, 高质量浓度 PM_{2.5}暴露时低温效应在滞后第 3 天出现, RR(95% CI) 为 1.02(1.00~1.04), 于滞后第 10 天达到最高值, 第 18~30 天出现明显的收获效应; 而低质量浓度 PM_{2.5}暴露时低温效应在滞后第 2 天开始出现, RR(95% CI) 为 1.02(1.00~1.05), 至第 11 天最大, 直到滞后第 18 天消失, 见图 2B。

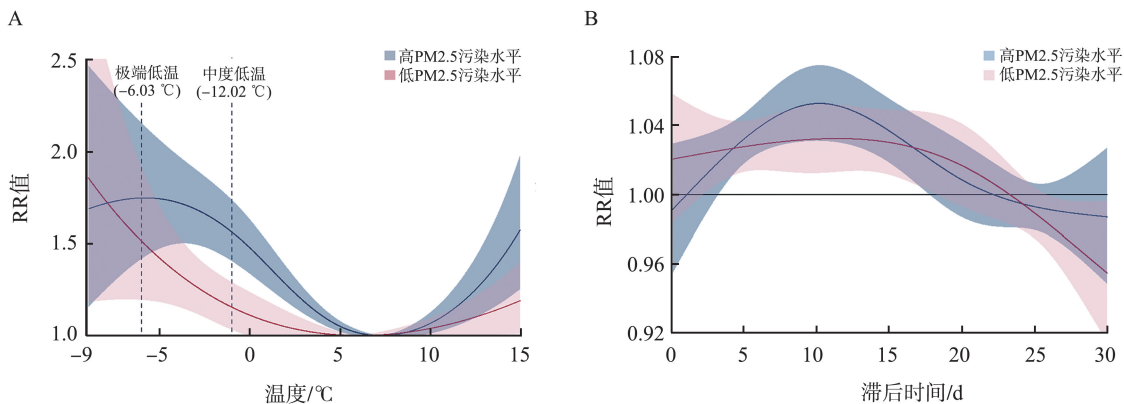


图 2 2020—2023 年德州冷季高/低 PM_{2.5}质量浓度下修饰的低温-急救呼叫风险

A: 累积效应; B: 滞后效应。

Figure 2 Modification of low-temperature on emergency call risk by high/low PM_{2.5} mass concentrations during the cold season in Dezhou City from 2020 to 2023

A: Cumulative effect plot; B: Lag effect plot.

2.4 冷季 PM_{2.5}组分对低温-急救呼叫风险的修饰效应分析

PM_{2.5}组分的修饰效应分析结果显示, 高 BC 污染水平下的极端低温相关急救呼叫累积 RR(95% CI) 为 1.84(1.50~2.26), 高于低 BC 污染水平的

1.44(1.13~1.82), 差异有统计学意义($P < 0.05$); 高 OM 污染水平的极端低温相关急救呼叫累积 RR(95% CI) 为 1.84(1.52~2.23), 高于低 OM 污染水平的 1.41(1.12~1.79), 差异有统计学意义($P < 0.01$), 见表 2。

表2 2020—2023年德州冷季PM_{2.5}组分对低温-急救呼叫风险的修饰效应

Table 2 The modification effects of PM_{2.5} components on the risk of low temperature-emergency calls during the cold season in Dezhou City from 2020 to 2023

PM _{2.5} 组分	污染水平	RR(95%CI)	
		极端低温	中度低温
SO ₄ ²⁻	低 ^{ref}	1.62(1.28~2.05)	1.17(1.05~1.31)
	高	1.72(1.38~2.13)	1.52(1.37~1.69)**
NH ₄ ⁺	低 ^{ref}	1.58(1.25~1.99)	1.18(1.05~1.32)
	高	1.71(1.38~2.11)	1.55(1.40~1.73)**
NO ₃ ⁻	低 ^{ref}	1.58(1.25~2.00)	1.19(1.05~1.34)
	高	1.72(1.38~2.13)	1.60(1.43~1.79)**
BC	低 ^{ref}	1.44(1.13~1.82)	1.16(1.04~1.30)
	高	1.84(1.50~2.26)*	1.59(1.42~1.77)**
OM	低 ^{ref}	1.41(1.12~1.79)	1.16(1.04~1.30)
	高	1.84(1.52~2.23)**	1.63(1.46~1.82)**

注:^{ref}参考组; *P<0.05 vs. 参考组; **P<0.01 vs. 参考组。

2.5 敏感性分析

敏感性分析结果显示,分别将最大滞后天数延长至33和35 d,滞后天数的df由4增加到5以及相对湿度的df调整为3的自然立方样条函数纳入模型,结果的变化均无统计学意义(P>0.05),表明模型稳健,见表3。

表3 低温对德州市急救呼叫风险的敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of the effect of low-temperature to emergency call risk in Dezhou City

模型	极端低温	中度低温
主模型 ^{ref}	1.61(1.36~1.91)	1.40(1.27~1.54)
最大滞后天数:33 d	1.72(1.45~2.04)	1.34(1.23~1.47)
最大滞后天数:35 d	1.78(1.48~2.14)	1.37(1.25~1.51)
df 滞后天数=5	1.69(1.42~2.01)	1.41(1.28~1.55)
df 相对湿度=3	1.56(1.32~1.85)	1.39(1.26~1.52)

注:^{ref}参考组。结果的变化均无统计学意义。

3 讨论

在全球气候变化背景下,低温暴露对公众健康的威胁日益凸显。急救呼叫作为反映健康风险的敏感指标,其与极端气温的关联虽已在我国部分地区得到初步证实^[20],但现有研究针对北方寒区城市的探讨尚不充分,也较少探讨PM_{2.5}组分的修饰作用。本研究以兼具冬季PM_{2.5}高污染与寒潮频发特征的德州市为研究区域,系统评估了冷季低温暴露与急救呼叫风险的关联,并分析了PM_{2.5}及其组分的修饰效应。研究结果不仅丰富了我国北方工业城市在复合污染条件下低温健康风险数据,也为制定更具针对性的极端天气健康防护策略提供了科学依据。

Zhan等^[21]对深圳市环境温度暴露对急救呼叫影响的研究表明,寒冷的滞后效应可持续3~4周;艾思奇等^[22]对河南省的相关研究发现,低温在滞后22 h显著增加每小时急救呼叫频次。本研究发现,低温暴露会显著增加急救呼叫风险,且有明显的滞后性,与既往研究结果一致,提示应加强对低温事件的公共卫生防护,并重点关注其延迟性健康影响。王裕新等^[23]对天津市的研究发现,天津市PM_{2.5}暴露与非意外死亡风险升高有关;Cui等^[24]研究发现,长期暴露于元素碳(elemental carbon, EC)等PM_{2.5}组分,可能会加心衰风险。然而,关于PM_{2.5}及组分对低温健康效应的修饰作用,目前的研究仍较为有限。山东省的一项研究发现,PM_{2.5}每增加10 μg/m³,与极端低温相关的死亡风险上升3.0%,其中OM的修饰效应最为显著^[8];Zhou等^[9]对基于中国32个区县的研究发现,NH₄⁺和SO₄²⁻浓度每上升一个四分位数间距,寒冷相关死亡风险分别增加2.2%和1.5%。本研究发现,高质量浓度的PM_{2.5}及组分(尤其是BC和OM)对低温-急救呼叫频次关联的修饰作用更强,与上述研究部分一致。这一差异可能与研究设计、地域特点、人群特征以及污染物组成的异质性有关。

PM_{2.5}及组分加剧低温暴露相关急救呼叫风险的潜在机制可能涉及氧化应激、全身炎症反应、自主神经系统激活、缺血以及血栓形成等途径^[25-26]。OM可通过芳香烃受体介导的氧化应激途径对心脏产生毒性效应^[27];PM_{2.5}及其主要组分(如EC和BC)可诱导炎症介质(TNF-α、IL-6和IL-8)高表达,进而增强低温对机体的刺激^[28]。此外,低温本身可通过提高血液黏稠度、诱发血管收缩性高压等途径协同促进动脉血栓形成,增加急性心肌梗死风险^[29-30];其对气管黏膜纤毛清除功能的抑制也可能增加病原体在肺部的沉积率,间接引发呼吸系统疾病^[31]。在冬季燃煤供暖期间,生物质和化石燃料的不完全燃烧加剧^[24,32],导致BC和OM的排放比例相对上升,这可能是两者在冷季修饰效应更为显著的部分原因,但其具体机制仍需进一步研究来予以阐明。

本研究存在以下局限性:①暴露因素为栅格化数值,可能与个体在急救呼叫发生前的真实暴露水平存在一定差异;②未对不同病因进行分层分析,因此难以识别具体的脆弱人群;③气象与空气污染数据源自地面监测站点,其本身存在一定的测量不确定性,可能引入残余混杂或暴露测量误差,从而对关联的估计造成潜在干扰;④在构建分布滞后非线性

模型时,对滞后天数与基线函数的选择依赖于特定统计假设,这可能在一定程度上影响部分估计结果的稳健性。

综上所述,冷季低温暴露是导致急救呼叫频次显著增加的重要风险因素;高浓度PM_{2.5}及其关键组分OM和BC可进一步增强上述关联强度。本研究为理解气候变化与空气污染对人群健康产生的协同威胁提供了新的流行病学证据,也为德州市及同类型城市制定精准化的极端天气健康预警策略、构建气候适应型的公共卫生防护体系提供了关键的科学依据。

参考文献:

- [1] GBD 2021 Causes of Death Collaborators. Global burden of 288 causes of death and life expectancy decomposition in 204 countries and territories and 811 subnational locations, 1990-2021: a systematic analysis for the global burden of disease study 2021 [J]. *Lancet*, 2024, 403 (10440): 2100-2132.
- [2] Wang W, Zeng J, Li XL, et al. Using a novel strategy to identify the clustered regions of associations between short-term exposure to temperature and mortality and evaluate the inequality of heat- and cold-attributable burdens: a case study in the Sichuan Basin, China [J]. *J Environ Manage*, 2024, 349: 119402. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119402
- [3] Díaz J, López-Bueno JA, Sáez M, et al. Will there be cold-related mortality in Spain over the 2021-2050 and 2051-2100 time horizons despite the increase in temperatures as a consequence of climate change? [J]. *Environ Res*, 2019, 176: 108557. doi: 10.1016/j.envres.2019.108557
- [4] Ma SM, Zhu CW. Extreme cold wave over east Asia in January 2016: a possible response to the larger internal atmospheric variability induced by Arctic warming [J]. *J Climate*, 2019, 32(4): 1203-1216.
- [5] Sangkharat K, Mahmood MA, Thornes JE, et al. Impact of extreme temperatures on ambulance dispatches in London, UK [J]. *Environ Res*, 2020, 182: 109100. doi: 10.1016/j.envres.2019.109100
- [6] Cui YJ, Ai SQ, Liu YY, et al. Hourly associations between ambient temperature and emergency ambulance calls in one central Chinese city: call for an immediate emergency plan [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 711: 135046. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135046
- [7] Yang CY, Chen XY, Chen RJ, et al. Daily ambient temperature and renal colic incidence in Guangzhou, China: a time-series analysis [J]. *Int J Biometeorol*, 2016, 60(8): 1135-1142.
- [8] 赵忠辉. 山东省空气颗粒物所致死亡风险及其与气温的交互作用 [D]. 济南: 山东大学, 2024.
- [9] Zhou PX, Hu JL, Yu CH, et al. Short-term exposure to fine particulate matter constituents and mortality: case-crossover evidence from 32 counties in China [J]. *Sci China Life Sci*, 2022, 65(12): 2527-2538.
- [10] 王丽, 李庆生, 梁秀清, 等. 2010年德州异常气候分析 [J]. *山东气象*, 2013, 33(1): 27-29.
WANG Li, LI Qingsheng, LIANG Xiuqing, et al. Analysis of abnormal climate in Dezhou in 2010 [J]. *Journal of Shandong Meteorology*, 2013, 33(1): 27-29.
- [11] 王文玲. 德州市冬季大气PM_{2.5}污染特征及成因分析 [J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(5): 171-173.
WANG Wenling. Analysis on the characteristics and causes of winter atmospheric PM_{2.5} pollution in Dezhou City [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(5): 171-173.
- [12] 张璐涵, 庄富起, 杜妍慧, 等. 2019年山东省德州市和济南市PM_{2.5}中金属污染特征及健康风险评估 [J]. *环境卫生学杂志*, 2022, 12(11): 825-833.
ZHANG Luhan, ZHUANG Fuqi, DU Yanhui, et al. Pollution characteristics of metals in PM_{2.5} and their health risk assessment in Dezhou and Jinan of Shandong Province, China, 2019 [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2022, 12(11): 825-833.
- [13] Xiao QY, Geng GN, Cheng J, et al. Evaluation of gap-filling approaches in satellite-based daily PM_{2.5} prediction models [J]. *Atmos Environ*, 2021, 244: 117921. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117921
- [14] Geng GN, Xiao QY, Liu SG, et al. Tracking air pollution in China; near real-time PM_{2.5} retrievals from multi-source data fusion [J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55(17): 12106-12115.
- [15] Zhao Q, Li SS, Coelho MSZS, et al. Assessment of intraseasonal variation in hospitalization associated with heat exposure in Brazil [J]. *JAMA Netw Open*, 2019, 2(2): e187901. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2018.7901
- [16] Ma CC, Yang J, Nakayama SF, et al. Cold spells and cause-specific mortality in 47 Japanese prefectures: a systematic evaluation [J]. *Environ Health Perspect*, 2021, 129(6): 67001. doi: 10.1289/EHP7109
- [17] Luo K, Li RK, Wang ZS, et al. Effect modification of the association between temperature variability and daily cardiovascular mortality by air pollutants in three Chinese cities [J]. *Environ Pollut*, 2017, 230: 989-999. doi: 10.1016/j.envpol.2017.07.045
- [18] Zhao JH, Zhang YM, Ni Y, et al. Effect of ambient

- temperature and other environmental factors on stroke emergency department visits in Beijing: a distributed lag non-linear model [J]. *Front Public Health*, 2022, 10: 1034534. doi: 10.3389/fpubh.2022.1034534
- [19] Altman DG, Bland JM. Interaction revisited: the difference between two estimates [J]. *BMJ*, 2003, 326 (7382): 219. doi: 10.1136/bmj.326.7382.219
- [20] 张艺, 郑浩, 孙凤霞, 等. 2020—2022年南京市极端气温对居民急救接诊量的影响和归因风险研究[J]. *现代预防医学*, 2023, 50(22): 4077-4082.
ZHANG Yi, ZHENG Hao, SUN Fengxia, et al. The impact and attributable risk of extreme temperature on the number of emergency ambulance calls in Nanjing [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2023, 50 (22): 4077-4082.
- [21] Zhan ZY, Yu YM, Qian J, et al. Effects of ambient temperature on ambulance emergency call-outs in the subtropical city of Shenzhen, China [J]. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0207187. doi: 10.1371/journal.pone.0207187
- [22] 艾思奇, 秦历杰, 崔英杰, 等. 环境温度暴露对急救呼叫的影响: 基于许昌市和郑州市数据的时间序列分析 [J]. *中华预防医学杂志*, 2021, 55(2): 194-199.
AI Siqi, QIN Lijie, CUI Yingjie, et al. The impact of ambient temperature exposure on emergency calls—a time series analysis based on data of Xuchang and Zhengzhou [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2021, 55 (2): 194-199.
- [23] 王裕新, 曹茹, 黄婧, 等. 不同表观温度水平下大气细颗粒物暴露对人群非意外死亡的影响 [J]. *北京大学学报(医学版)*, 2024, 56(5): 820-827.
WANG Yuxin, CAO Ru, HUANG Jing, et al. Impact of fine particulate matter exposure on non-accidental mortality under different apparent temperature levels [J]. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 2024, 56(5): 820-827.
- [24] Cui FP, Zheng L, Zhang J, et al. Long-term exposure to fine particulate matter constituents, genetic susceptibility, and incident heart failure among 411,807 adults [J]. *Eur J Heart Fail*, 2024. doi: 10.1002/ejhf.3486
- [25] Bhatnagar A. Cardiovascular effects of particulate air pollution [J]. *Annu Rev Med*, 2022, 73: 393-406. doi: 10.1146/annurev-med-042220-011549
- [26] Hadei M, Naddafi K. Cardiovascular effects of airborne particulate matter: a review of rodent model studies [J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125204. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125204
- [27] Liu TT, Jiang B, Fu BQ, et al. PM_{2.5} induces cardiomyoblast senescence via AhR-mediated oxidative stress [J]. *Antioxidants (Basel)*, 2024, 13(7): 786. doi: 10.3390/antiox13070786
- [28] Luo B, Liu JT, Fei GQ, et al. Impact of probable interaction of low temperature and ambient fine particulate matter on the function of rats alveolar macrophages [J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2017, 49: 172-178. doi: 10.1016/j.etap.2016.12.011
- [29] Abrignani MG, Lombardo A, Braschi A, et al. Climatic influences on cardiovascular diseases [J]. *World J Cardiol*, 2022, 14(3): 152-169.
- [30] 孔德慧. 北京地区寒潮—热浪和极端湿度对急性心肌梗死住院的影响研究 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2020.
- [31] Buckley JP, Richardson DB. Seasonal modification of the association between temperature and adult emergency department visits for asthma: a case-crossover study [J]. *Environ Health*, 2012, 11: 55. doi: 10.1186/1476-069X-11-55
- [32] Cheng Y, He KB, Engling G, et al. Brown and black carbon in Beijing aerosol: implications for the effects of brown coating on light absorption by black carbon [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 599: 1047-1055. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.061

(编辑: 郑潇)