

暖季夜间高温对淄博市居民心血管疾病死亡的影响

岳芳¹, 乔颖异¹, 石兴龙¹, 徐欣颖¹, 吕婧¹, 程传龙¹, 左慧¹, 崔峰², 李秀君¹

(1.山东大学齐鲁医学院公共卫生学院生物统计学系, 山东 济南 250012;

2.淄博市疾病预防控制中心, 山东 淄博 255026)

摘要:目的 分析暖季夜间高温对淄博市居民心血管疾病死亡的影响,探讨心血管疾病患者中对夜间高温易感的人群。方法 收集淄博市2015年1月1日至2019年12月31日每日心血管疾病死亡资料、每日气象和空气污染资料;计算热夜过量(hot night excess, HNE),即夜间每小时高于热夜阈值的过量温度累加之和,以评估夜间高温强度;采用分布滞后非线性模型探究夜间高温对心血管疾病死亡的影响及滞后效应,并根据年龄、性别进行亚组分析。结果 研究期间暖季(5~9月)淄博市因心血管疾病死亡28 097人。暴露-反应关系曲线显示HNE与心血管疾病死亡相关,且存在滞后性。极端HNE与心血管疾病死亡的单日滞后效应在暴露当天最大,RR值为1.09(95%CI: 1.03~1.15);累积滞后效应在第7天最大,RR值为1.40(95%CI: 1.27~1.54)。HNE对缺血性心脏病和心肌梗死的死亡效应较高,导致女性和≥65岁人群死亡的归因风险较大。结论 夜间高温会增加淄博市居民心血管疾病死亡风险,缺血性心脏病患者、女性和≥65岁人群对夜间极端高温较敏感。应在高温预警系统中考虑夜间高温,关注脆弱人群,根据夜间高温的危害制定有针对性的干预保护措施。

关键词:夜间高温;心血管疾病;死亡风险;分布滞后非线性模型

中图分类号:R122 文献标志码:A

Effect of nighttime heat on mortality risk of cardiovascular disease during warm seasons in Zibo City

YUE Fang¹, QIAO Yingyi¹, SHI Xinglong¹, XU Xinying¹, LYU Jing¹, CHENG Chuanlong¹, ZUO Hui¹, CUI Feng², LI Xiujun¹

(1. Department of Biostatistics, School of Public Health, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan 250012, Shandong, China; 2. Zibo Center for Disease Control and Prevention, Zibo 255026, Shandong, China)

Abstract: Objective To investigate the impact of nighttime heat on cardiovascular disease mortality during warm seasons in Zibo City, and to identify patients with cardiovascular disease who are sensitive to nighttime heat.

Methods The daily cardiovascular disease death data, meteorological and air pollution data in Zibo City were collected from December 31 2015 to January 1 2019. The intensity of nighttime heat was assessed using the hot night excess (HNE) index, which was calculated by determining the excess sum of high temperatures during the night. The distributed lag nonlinear model was used to analyse the impact and lag effects of nighttime heat on cardiovascular disease mortality. Subgroup analyses were performed by age and gender. **Results** During the study period, there were 28,079 deaths due to cardiovascular disease in warm seasons (May to September). The exposure-response relationship curve showed that HNE was associated with cardiovascular disease mortality, with a lag effect. The relative risk of extreme HNE peaked at days 0 after exposure, with RR of 1.09 (95%CI: 1.03-1.15); the cumulative effect peaked at the 7th day, with RR of 1.40 (95%CI: 1.27-1.54). Mortality risk was higher for ischemic heart disease and myocardial infarction than for cardiovascular disease and cerebrovascular disease. Furthermore, females and the elderly (aged ≥ 65

years) had a higher attributable risk. **Conclusions** Nighttime heat was associated with an increased risk of mortality from cardiovascular disease. Patients with ischemic heart disease, females and people aged ≥ 65 years were more susceptible to extreme nighttime heat. It is necessary to consider nighttime heat in heatwave warning systems and to focus on vulnerable populations. Targeted public intervention strategies should be implemented based on the hazards of nighttime heat.

Key words: Nighttime heat; Cardiovascular disease; Mortality risk; Distributed lag nonlinear model

心血管疾病是全球死亡的首要原因^[1]。据《中国心血管健康与疾病报告 2023 概要》显示,我国现有约 3.3 亿人患心血管疾病,且患病率和死亡率呈上升趋势,给社会和家庭造成沉重的疾病负担^[2]。研究表明,高温会增加心血管疾病的死亡风险^[3-5],温度每升高 1 °C,心血管疾病相关死亡率增加 2.1%,发病率增加 0.5%^[6]。随着气候变暖,全球多数地区将面临更频繁的昼夜高温天气^[7],夜间温度增幅预计将超过日间^[8-9]。此前关于高温与心血管疾病死亡率的研究主要集中在全天的热暴露上,近年研究表明,夜间温度的升高也可能增加心血管疾病死亡的风险^[10-11]。夜间温度相对较低,可以缓解日间高温带来的不适,若夜间温度升高,可能会给身体带来额外的负担。两项全球多区域研究提出了一项新的指标热夜过量(hot night excess, HNE),即夜间每小时高于热夜阈值的过量温度累加之和,利用该指标衡量夜间高温强度,发现夜间高温与死亡率有显著关联^[12-13],然而国内关于夜间高温对心血管疾病死亡影响的研究相对较少。

因此,本研究收集了山东省淄博市 2015 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日心血管疾病死亡数据,利用 HNE 指标探讨夜间高温对心血管疾病死亡的影响,并根据年龄和性别进行亚组分析,以识别对夜间高温敏感的人群,为气候变化背景下的区域公共卫生政策制定提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

选取 2015 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日淄博市心血管疾病死亡数据,其来源于山东省慢病、死因监测综合管理信息系统,包括死者性别、年龄和根本死因等相关信息。根据《国际疾病分类》第 10 版(ICD-10)对心血管疾病死因(I00~I99)进行分类,主要包括缺血性心脏病(I20~I25)及其亚型心肌梗死(I21)、脑血管疾病(I60~I69)。同期淄博市每小时气象数据来源于欧洲中期天气预报中心的第五代大气再分析数据集(European centre for medium

range weather forecasting reanalysis 5, ERA5),包括 2 m 的空气温度和湿度,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ^[14]。空气污染物数据来源于中国高空空气污染物数据集(<https://weijingrs.github.io/product.html>),收集 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度,空间分辨率为 1 km × 1 km,其准确性已在前期研究得到验证^[15-16]。计算区域栅格内的平均值来确定每小时温度、相对湿度及每日污染物浓度。

1.2 热夜过量指标计算

本研究主要关注夜间高温对心血管疾病死亡的影响,为避免低温的影响,将研究时间限制为每年的暖季(5~9月)^[12]。参考已有研究,本研究采用 HNE 评估夜间高温强度,该指标由夜间时间段内超过热夜阈值的过量温度累加而得^[12-13],见公式:

$$HNE = \sum_i^{h_j} (t_{ij} - T_{thr}) \times I_{T_{thr}}(t_{ij}),$$

$$I_{T_{thr}}(t_{ij}) = \begin{cases} 0, & \text{if } t_{ij} < T_{thr} \\ 1, & \text{if } t_{ij} \geq T_{thr} \end{cases},$$

其中, h_j 为第 j 天夜间总小时数,从行为和流行病学的角度将夜间定义为前 1 天 20:00 开始至当天 08:00 前的 12 h,即 $h_j = 12$; $I_{T_{thr}}(t_{ij})$ 为指示变量; t_{ij} 为第 j 天夜间第 i 小时的温度; T_{thr} 为热夜阈值,定义为研究期间每日最低温度的第 95 百分位数(P_{95}),若夜间温度超过该阈值时即视为热夜^[12]。本研究未按照气象学的日落到日出时段定义夜间,因为多数人在日落后傍晚时间仍然会进行日间活动,若将该时段纳入夜间可能会引入不必要的噪声^[17]。此外,本研究定义的夜间包含了日出前后时间,通常会出现每日的最低温度,若在此期间出现高温可能对身体健康有害^[18-19]。

1.3 统计学处理

由于每日心血管疾病死亡人数为计数资料且为小概率事件,存在过度离散现象,因此以拟泊松分布为连接函数,采用分布滞后非线性模型评估 HNE 对心血管疾病死亡的效应^[17]。采用自然样条函数拟合 HNE 与心血管疾病死亡之间的暴露反应关系。为避免日间温度的影响,控制了日最高温度,同时控制了夜间相对湿度、时间趋势、星期几效应和节假日效应的影响。模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Log}[E(Y_t)] = & \alpha + \beta \text{HNE}_{t,l} + ns(\text{RH}, 3) \\ & + ns(\text{max}T, 3) + ns(\text{Time}, 4 \times 5) \\ & + \text{DOW} + \text{HOLIDAY}, \end{aligned}$$

其中, Y_t 代表第 t 天心血管疾病死亡的人数; α 为常数项; $\text{HNE}_{t,l}$ 代表第 t 天 HNE 与滞后时间 l 的交叉基函数, 其中暴露维度采用自然立方样条函数进行拟合, 在第 50 百分位数设置一个节点, 滞后维度也采用自然立方样条函数, 自由度为 3, 滞后时间设置为 7 d^[17]; β 为交叉基矩阵系数; $ns(\cdot)$ 为自然立方样条函数; RH 代表第 t 天夜间平均相对湿度, 具体为本研究定义的夜间 12 h 的平均相对湿度; $\text{max}T$ 代表日最高温度; Time 为时间变量, 用于控制未测量的长期趋势和季节趋势; DOW 和 HOLIDAY 分别为控制星期几效应和节假日效应的分类变量。根据先前文献知识, 本研究将时间自由度设为 4/年^[5], 夜间相对湿度和日最高温度的自由度设为 3^[20]。

为降低暴露极值处样本量小及其置信区间较宽而引起的统计不确定性, 本研究绘制的 HNE 与心血管疾病死亡人数的暴露-反应关系曲线限制在 HNE 序列的第 1 百分位数到第 99 百分位数^[21]。本研究以非热夜 HNE = 0 为参考值, 将极端 HNE 定义为研究期间 HNE 分布的第 95 百分位数, 计算极端 HNE 相对于参考值在不同滞后期的相对危险度 (relative risk, RR) 及其 95% 置信区间 (confidence intervals, CI), 以评估夜间高温对心血管疾病死亡的影响。同时根据参考文献^[22], 计算人群归因分值 (attribute fraction, AF) 和归因人数 (attribute number, AN), 以评估 HNE 造成的

归因风险。

为识别夜间高温的脆弱人群, 按照性别组 (男性、女性)、年龄组 (<65 岁、≥65 岁) 进行亚组分析, 并采用 Z 检验判断亚组之间效应差异是否有统计学意义^[23]。为检查研究结果的稳健性, 对心血管疾病死亡总人群及特定死因人群进行以下敏感性分析: ①改变最大滞后时间为 5、10 d; ②改变热夜阈值为研究期间日最低温度的第 92.5 百分位数; ③在模型中控制日平均温度而非日最高温度; ④控制累积滞后 7 d 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 O_3 浓度。采用 R4.3.2 软件中的 “dlnm” 和 “spline” 软件包进行统计分析。检验水准 $\alpha = 0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 描述性分析

2015—2019 年暖季 (5~9 月) 淄博市居民心血管疾病死亡人数共计 28 097 人, 因缺血性心脏病死亡 15 581 人 (55.5%), 因脑血管疾病死亡 9 668 人 (34.4%), 其中缺血性心脏病死亡有 8 804 人为心肌梗死; 总心血管疾病日均死亡人数约为 37 人, 男性和 65 岁及以上日均死亡人数分别高于女性和 65 岁以下死亡人数。

研究期间, HNE 中位数为 0.1 °C, 均值为 5.3 °C。日最高温度均值为 27.1 °C, 日均温度和夜间相对湿度均值分别为 22.3 °C 和 69.9%, 空气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 日均浓度为 49.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 156.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。见表 1。

表 1 2015—2019 年淄博市暖季每日心血管疾病死亡数、气象因素及空气污染物分布特征

Table 1 Distribution of daily cardiovascular disease mortality, meteorological variables and air pollution in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019

变量	均数	标准差	最小值	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值
日死亡人数/例							
总心血管疾病	37	9	16	31	36	41	117
缺血性心脏病	20	6	7	16	20	23	78
心肌梗死	12	4	3	9	11	14	53
脑血管疾病	13	4	2	10	13	15	33
性别							
男	19	5	7	15	18	22	52
女	18	6	5	14	18	21	65
年龄/岁							
<65	6	3	0	4	6	8	17
≥65	31	8	11	26	30	35	106
气象因素							
HNE/°C	5.3	10.4	0.0	0.0	0.1	5.2	59.5
日最高温度/°C	27.1	3.5	13.5	24.8	27.3	29.6	35.1
日均温度/°C	22.3	3.4	11.8	20.0	22.4	24.8	29.3
夜间相对湿度/%	69.9	10.6	18.9	64.5	73.1	78.0	88.0
空气污染/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							
$\text{PM}_{2.5}$	49.0	22.0	5.3	33.2	44.2	60.2	142.7
O_3	156.6	46.5	19.0	124.0	156.0	190.0	282.0

2015—2019年暖季(5~9月)淄博市HNE的分布特征显示,其中HNE>0的天数主要集中在夏季6~8月,占研究期间HNE>0天数的91.4%;较

大的HNE发生在盛夏7月,中位数为7.7℃;5月和9月大部分天数HNE为0℃,属于非热夜。见图1。

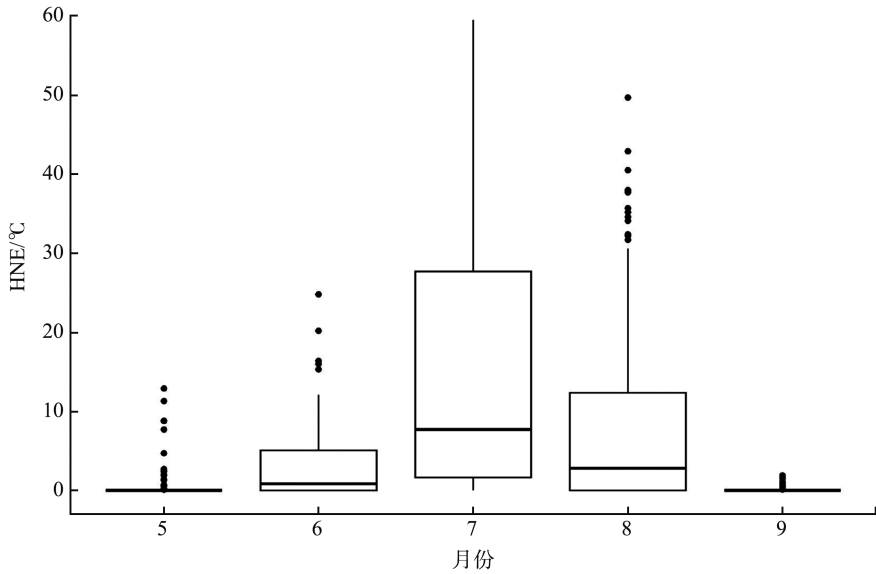


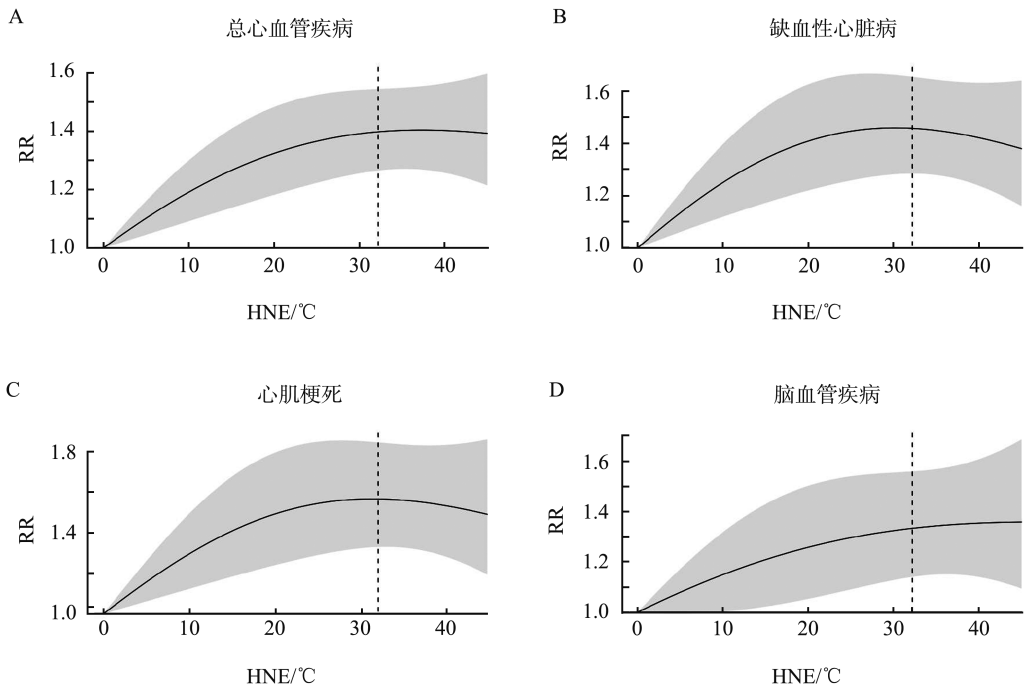
图1 2015—2019年淄博市暖季HNE月度分布特征

Figure 1 Distribution of monthly HNE in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019

2.2 夜间高温对心血管疾病死亡的影响

以HNE=0作为参考,HNE与心血管疾病及疾

病亚型死亡关联的暴露-反应曲线趋势相似,随着HNE增加,死亡风险明显增加。见图2。



注:垂直虚线代表HNE的第95百分位数32.2℃。

图2 2015—2019年淄博市暖季HNE与心血管疾病及疾病亚型死亡的暴露-反应曲线

Figure 2 Exposure-response relationship between HNE and mortality from cardiovascular disease and its subtypes in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019

绘制极端HNE(P_{95} , 32.2℃)的滞后效应图(图3)。在单日滞后效应中,极端HNE对总心血

管疾病死亡风险的效应在暴露当天达到峰值并持续下降,滞后5d后效应值无统计学意义,最大效

应 RR 为 1.09(95%CI: 1.03~1.15);极端 HNE 对缺血性心脏病死亡和心肌梗死的效应在暴露当天持续到 4 d 均较大,随后呈下降趋势,同样在滞后 5 d 后效应值无统计学意义;而极端 HNE 对脑血管疾病死亡的效应呈先下降后上升趋势,但效应值无统计学意义。在累积滞后效应中,极端 HNE 对

总心血管疾病和脑血管疾病死亡的效应在滞后 0~7 d 达到最大,分别为 1.40(95%CI: 1.27~1.54)和 1.33(95%CI: 1.14~1.56),对于缺血性心脏病和心肌梗死,在滞后 0~6 d 达到最大,RR 值分别为 1.50(95%CI: 1.33~1.69)和 1.60(95%CI: 1.37~1.86)。见图 3。

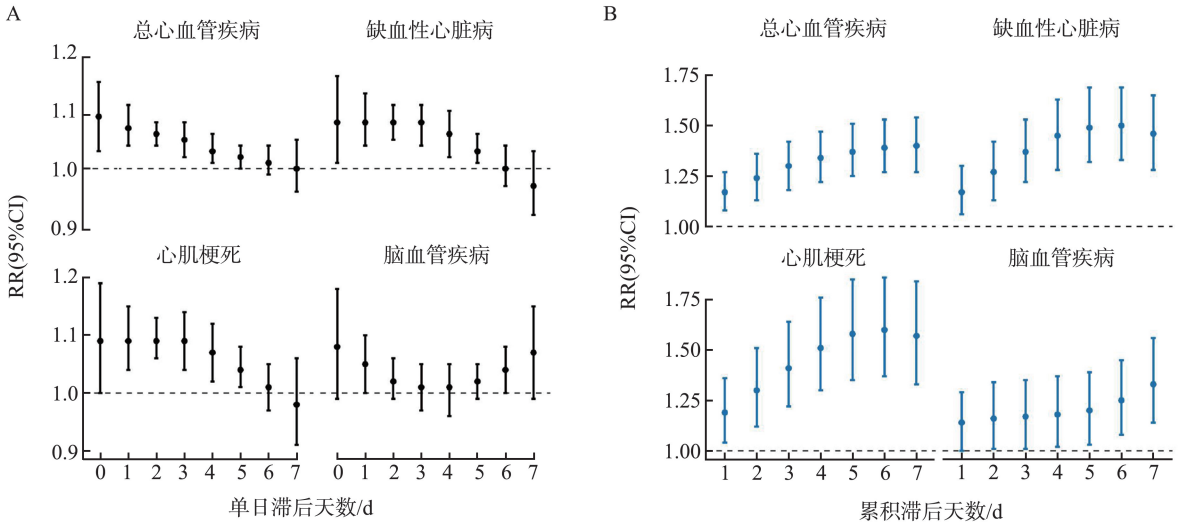


图 3 2015—2019 年淄博市暖季极端 HNE 对心血管疾病及疾病亚型死亡的滞后效应

A: 单日滞后效应; B: 累积滞后效应。

Figure 3 Lag effects of extreme HNE on mortality from cardiovascular disease and its subtypes in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019

A: Single-day lag effects; B: Cumulative lag effects.

2.3 亚组分析

选择各疾病亚型累积滞后效应值最大的滞后天数进行亚组分析,结果显示,在心血管疾病亚型的总人群中,极端 HNE 对缺血性心脏病(RR = 1.50, 95%CI: 1.33~1.69)及其亚型心肌梗死(RR = 1.60, 95%CI: 1.37~1.86)的死亡风险高于脑血管疾病(RR = 1.33, 95%CI: 1.14~1.56),在各性别亚组和

≥65 岁人群中也是如此;而在 <65 岁人群中,极端 HNE 对脑血管疾病风险较大(RR = 1.33, 95%CI: 0.95~1.84),但效应值无统计学意义。在心血管疾病及疾病亚型中按性别、年龄分层分析显示,女性和 ≥65 岁的人群对极端 HNE 更敏感,但亚组间差异均无统计学意义(P>0.05)。见表 2。

表 2 2015—2019 年淄博市暖季极端 HNE 对心血管疾病亚组死亡的累积效应[RR(95%CI)]

Table 2 Cumulative effects of extreme HNE on mortality from different subgroups of cardiovascular disease in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019 (relative risk, 95% confidence interval)

病因	总人群	性别		年龄	
		男	女	<65 岁	≥65 岁
总心血管疾病	1.40(1.27~1.54)	1.36(1.21~1.54)	1.44(1.25~1.65)	1.33(1.08~1.64)	1.41(1.27~1.58)
缺血性心脏病	1.50(1.33~1.69)	1.53(1.31~1.79)	1.47(1.25~1.74)	1.29(0.98~1.70)	1.54(1.35~1.75)
心肌梗死	1.60(1.37~1.86)	1.58(1.29~1.93)	1.62(1.31~2.00)	1.32(0.94~1.85)	1.67(1.41~1.97)
脑血管疾病	1.33(1.14~1.56)	1.25(1.03~1.53)	1.43(1.14~1.79)	1.33(0.95~1.84)	1.33(1.12~1.58)

2.4 HNE 对心血管疾病死亡的归因风险

以 HNE = 0 作为参考,计算暖季 HNE 导致的心血管疾病死亡归因风险如表 3。HNE 对总心血管疾病死亡的 AF 值为 6.83%(95%CI: 1.32%~8.39%),对应的归因死亡人数为 1 920 人。疾病

亚型中心肌梗死 AF 值最大为 9.34%(95%CI: 0.20%~10.27%)。除缺血性心脏病以外,其他疾病亚型中 HNE 导致女性心血管疾病死亡的 AF 值均高于男性;各疾病亚型中 ≥65 岁人群 AF 值均大于 <65 岁人群。

表3 2015—2019年淄博市暖季HNE相关的心血管疾病死亡归因风险

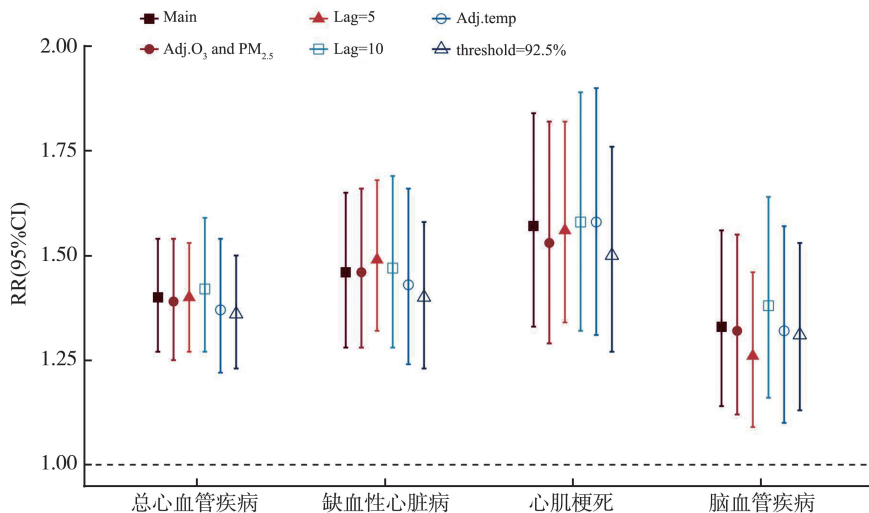
Table 3 Attributable risk of cardiovascular disease deaths related to HNE in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019

组别	死亡人数/n	AF(95%CI)/%	AN(95%CI)
总心血管疾病			
总体	28 097	6.83(1.32~8.39)	1 920(370~2 377)
男	14 347	5.78(0.32~7.73)	830(45~1 105)
女	13 750	7.95(1.35~9.44)	1 093(188~1 309)
<65岁	4 716	4.40(-3.83~8.22)	208(-176~386)
≥65岁	23 381	7.34(1.81~8.84)	1 716(420~2 076)
缺血性心脏病			
总体	15 581	8.20(1.80~10.04)	1 277(284~1 592)
男	7 630	8.34(-0.57~9.92)	637(-43~771)
女	7 951	8.11(1.82~12.44)	644(143~996)
<65岁	2 274	3.52(-5.90~11.68)	80(-134~266)
≥65岁	13 307	9.00(1.69~11.40)	1 198(224~1 532)
心肌梗死			
总体	8 804	9.34(0.20~10.27)	822(18~910)
男	4 426	7.59(-1.75~10.20)	336(-76~452)
女	4 378	11.11(-0.60~13.40)	487(-25~601)
<65岁	1 588	5.99(-7.54~12.84)	95(-120~201)
≥65岁	7 216	10.12(0.07~11.06)	730(5~793)
脑血管疾病			
总体	9 668	5.61(-1.47~8.03)	542(-142~781)
男	5 221	3.44(-1.22~9.95)	179(-62~518)
女	4 447	8.13(-3.51~8.98)	361(-157~394)
<65岁	1 826	2.94(-7.54~9.82)	54(-136~179)
≥65岁	7 842	6.25(-0.73~8.82)	490(-56~697)

2.5 敏感性分析

在心血管疾病及疾病亚型死亡人群中进行敏感性分析,结果显示,在改变最大滞后时间为5 d和10 d时,效应值未发生明显变化;在模型中调整主要污染物 $PM_{2.5}$ 和 O_3 累积滞后7 d浓度得到的效应与

原模型基本一致,控制日平均温度而不是日最高温度得到的效应也未发生显著变化;将HNE的热夜阈值定义为日最低温度的第92.5百分位数,得到的效应值仍保持稳定。见图4。



注:Main为本研究主模型;Adj. O_3 and $PM_{2.5}$ 为在模型中控制累积滞后7 d的 O_3 和 $PM_{2.5}$ 浓度;Lag=5和Lag=10为调整最大滞后为5、10 d;Adj.temp为控制平均温度而不是日最高温度;threshold=92.5%为将HNE温度阈值定义为日最低温度序列的第92.5百分位数。

图4 2015—2019年淄博市暖季极端HNE对心血管疾病死亡累积效应的敏感性分析

Figure 4 Sensitivity analysis of the cumulative effects of extreme HNE on cardiovascular disease mortality in Zibo City during warm seasons from 2015 to 2019

3 讨论

目前研究区分了日间和夜间高温对死亡或住院的影响^[18,24],但较少有研究评估夜间高温对心血管疾病死亡的影响。本研究以 HNE 衡量夜间高温的强度,评估夜间高温对心血管疾病死亡的影响。研究发现夜间高温显著增加心血管疾病死亡风险,且风险随 HNE 增加而上升,造成一定的疾病负担。研究结果强调了全球变暖背景下预防夜间高温危害的重要性。

研究分析表明,极端 HNE 导致心血管疾病死亡风险增加,与已有研究结果一致^[12-13]。既往研究也发现,相对于日间高温暴露,夜间高温对死亡或住院的风险更高^[18,24]。这些结果均表明夜间高温是一个重要的健康风险因素。夜间温度升高通过影响心肌细胞昼夜节律时钟,导致心血管疾病风险增加^[25]。此外,暴露于夜间高温时,持续的热应激通过干扰调节睡眠-觉醒周期导致睡眠障碍^[26],已有研究表明,这种睡眠障碍与血压升高存在显著关联,会增加心血管疾病死亡风险^[27-28]。

在单日滞后分析中,极端 HNE 与心血管疾病死亡的风险在暴露当天达到峰值,随后几天持续下降,并持续 5 d 左右,这一结果与部分研究结果一致^[29-30],提示应及时调整生活行为以应对当日夜间高温,关注夜间高温对身体健康的滞后影响。在累积滞后分析中,极端 HNE 与缺血性心脏病及其亚型心肌梗死的相关性更强,与相关研究一致,缺血性心脏病与脱水密切相关,而夜间水分摄入减少会加速脱水过程^[10],从而加剧心脏负担。

本研究发现,女性及 ≥ 65 岁人群对夜间高温的敏感性更高,与相关研究结果一致^[10,17,20]。归因风险结果也提示夜间高温对女性和 ≥ 65 岁人群影响较大。然而 Tao 等^[24]研究发现,夜间高温对男性和 < 45 岁人群心血管疾病发病的影响较大,与本研究结果不一致,可能是因为研究的结局、地区气候及人群存在差异,但均表明了夜间高温对心血管疾病患者的危害。夜间高温引起的女性心血管疾病死亡风险增加,可能是生理差异引起的,月经与更年期激素水平波动会影响体温调节^[31];此外,女性体脂百分比比较高,散热能力较低^[32]。老年人在夜间高温时面临更大的心血管疾病死亡风险,可归因于与年龄相关的生理变化和体温调节能力减弱^[33];且一些老年人为节省电量或认为空调不利于身体健康,在晚上

较少使用空调进行降温^[34],也会导致老年人在频繁的热夜面临更高的死亡风险。值得注意的是,在脑血管疾病年龄亚组中,HNE 对 < 65 岁人群的死亡风险也较大,提示也应多关注夜间高温对年轻脑血管疾病患者的影响。

本研究具有一定的局限性,首先,本研究中 HNE 的热夜阈值定义是基于淄博市最低气温分布,考虑到区域气候差异及人群的适应性,结论外推存在局限性;其次,本研究的夜间暴露基于气象监测数据,而非个体的真正暴露,可能会产生暴露错分偏倚。

综上所述,夜间高温会增加淄博市居民心血管疾病死亡风险,女性、老年人及缺血性心脏病患者对夜间高温更敏感。相关部门应在高温预警系统中考虑夜间高温,加强群众对夜间高温潜在危害的认识,关注脆弱人群,根据极端高温在不同时间段的危害制定有针对性的公共卫生措施。

参考文献:

- [1] Roth GA, Mensah GA, Johnson CO, et al. Global Burden of Cardiovascular Diseases and Risk Factors, 1990-2019: update from the GBD 2019 study [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(25): 2982-3021.
- [2] 国家心血管病中心, 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2023 概要 [J]. *中国循环杂志*, 2024, 39(7): 625-660. National Center for Cardiovascular Diseases, The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on cardiovascular health and diseases in China 2023: an updated summary [J]. *Chinese Circulation Journal*, 2024, 39(7): 625-660.
- [3] 白梅, 阎涵, 姜海强, 等. 2017—2021 年丹东市元宝区居民心脑血管疾病与气温的关联性研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2024, 41(4): 317-321. BAI Mei, YAN Han, JIANG Haiqiang, et al. Correlation between cardiovascular and cerebrovascular diseases and temperature in residents of Yuanbao district of Dandong city, 2017-2021 [J]. *Journal of Environment and Health*, 2024, 41(4): 317-321.
- [4] Zhu Q, Zhou M, Zare Sakhvidi MJ, et al. Projecting heat-related cardiovascular mortality burden attributable to human-induced climate change in China [J]. *EBioMedicine*, 2024, 103: 105119. doi: 10.1016/j.ebiom.2024.105119
- [5] Wu Y, Feng X, Li J, et al. Exposure to high-temperature

- and high-humidity environments associated with cardiovascular mortality [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2025, 290: 117746. doi: 10.1016/j.ecoenv.2025.117746
- [6] Liu J, Varghese BM, Hansen A, et al. Heat exposure and cardiovascular health outcomes: a systematic review and meta-analysis [J]. *Lancet Planet Health*, 2022, 6(6): 484-495.
- [7] Wang J, Chen Y, Tett SFB, et al. Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 528.
- [8] Zhuang YH, Zhang JY. Diurnal asymmetry in future temperature changes over the main Belt and Road regions [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 1749530.
- [9] Cox DTC, Maclean IMD, Gardner AS, et al. Global variation in diurnal asymmetry in temperature, cloud cover, specific humidity and precipitation and its association with leaf area index [J]. *Glob Chang Biol*, 2020, 26(12): 7099-7111.
- [10] Kim SE, Hashizume M, Armstrong B, et al. Mortality risk of hot nights: a nationwide population-based retrospective study in Japan [J]. *Environ Health Perspect*, 2023, 131(5): 57005.
- [11] Majeed H, Floras JS. Warmer summer nocturnal surface air temperatures and cardiovascular disease death risk: a population-based study [J]. *BMJ Open*, 2022, 12(3): e056806.
- [12] He C, Kim H, Hashizume M, et al. The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: a modelling study [J]. *Lancet Planet Health*, 2022, 6(8): e648-e657.
- [13] Royé D, Sera F, Tobías A, et al. Effects of hot nights on mortality in southern Europe [J]. *Epidemiology*, 2021, 32(4): 487-498.
- [14] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. *Earth Syst Sci Data*, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [15] Wei J, Li ZQ, Lyapustin A, et al. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM_{2.5} data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications [J]. *Remote Sens Environ*, 2021, 252: 112136. doi:10.1016/j.rse.2020.112136
- [16] Wei J, Li ZQ, Li K, et al. Full-coverage mapping and spatiotemporal variations of ground-level ozone (O₃) pollution from 2013 to 2020 across China [J]. *Remote Sens Environ*, 2022, 270: 112775. doi:10.13140/RG.2.2.14002.73928
- [17] Guo YT, Chan KH, Qiu H, et al. The risk of hospitalization associated with hot nights and excess nighttime heat in a subtropical metropolis: a time-series study in Hong Kong, 2000-2019 [J]. *Lancet Reg Health West Pac*, 2024, 51: 101168. doi: 10.1016/j.lanwpc.2024.101168
- [18] Murage P, Hajat S, Kovats RS. Effect of night-time temperatures on cause and age-specific mortality in London [J]. *Environ Epidemiol*, 2017, 1(2): e005. doi: 10.1097/EE9.0000000000000005
- [19] Smolensky MH, Portaluppi F, Manfredini R, et al. Diurnal and twenty-four hour patterning of human diseases: cardiac, vascular, and respiratory diseases, conditions, and syndromes [J]. *Sleep Med Rev*, 2015, 21: 3-11. doi: 10.1016/j.smrv.2014.07.001
- [20] He C, Breitner S, Zhang S, et al. Nocturnal heat exposure and stroke risk [J]. *Eur Heart J*, 2024, 45(24): 2158-2166.
- [21] Gao Y, Lin L, Yin P, et al. Heat Exposure and Dementia-Related Mortality in China [J]. *JAMA Netw Open*, 2024, 7(6): e2419250. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2024.19250
- [22] 谷少华, 贺天锋, 陆蓓蓓, 等. 基于分布滞后非线性模型的归因风险评估方法及应用 [J]. *中国卫生统计*, 2016, 33(6): 959-962.
- GU Shaohua, HE Tianfeng, LU Beibei, et al. Measures and application for attributable risk from distributed lag non-linear model [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2016, 33(6): 959-962.
- [23] Altman DG, Bland JM. Interaction revisited: the difference between two estimates [J]. *BMJ*, 2003, 326(7382): 219. doi: 10.1136/bmj.326.7382.219
- [24] Tao J, Zhang Y, Li Z, et al. Daytime and nighttime high temperatures differentially increased the risk of cardiovascular disease: a nationwide hospital-based study in China [J]. *Environ Res*, 2023, 236: 116740. doi: 10.1016/j.envres.2023.116740
- [25] Durgan DJ, Young ME. The cardiomyocyte circadian clock: emerging roles in health and disease [J]. *Circ Res*, 2010, 106(4): 647-658.
- [26] Obradovich N, Migliorini R, Mednick SC, et al. Night-time temperature and human sleep loss in a changing climate [J]. *Sci Adv*, 2017, 3(5): e1601555. doi: 10.1126/sciadv.1601555
- [27] Cappuccio FP, Cooper D, D'Elia L, et al. Sleep duration predicts cardiovascular outcomes: a systematic review and meta-analysis of prospective studies [J]. *Eur Heart J*, 2011, 32(12): 1484-1492.

- [28] Palagini L, Bruno RM, Gemignani A, et al. Sleep loss and hypertension: a systematic review [J]. *Curr Pharm Des*, 2013, 19(13): 2409-2419.
- [29] Liu J, Qi J, Yin P, et al. Rising cause-specific mortality risk and burden of compound heatwaves amid climate change [J]. *Nat Clim Chang*, 2024, 14(11): 1201-1209.
- [30] Liu J, Kim H, Hashizume M, et al. Nonlinear exposure-response associations of daytime, nighttime, and day-night compound heatwaves with mortality amid climate change [J]. *Nat Commun*, 2025, 16(1): 635. doi: 10.1038/s41467-025-56067-7
- [31] Nappi RE, Chedraui P, Lambrinoudaki I, et al. Meno-
- pause: a cardiometabolic transition [J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2022, 10(6): 442-456.
- [32] Yanovich R, Ketko I, Charkoudian N. Sex Differences in human thermoregulation: relevance for 2020 and beyond [J]. *Physiology (Bethesda)*, 2020, 35(3): 177-184.
- [33] Khraishah H, Ostergard RL Jr, Nabi SR, et al. Climate change and cardiovascular disease: who is vulnerable? [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2025, 45(1): 23-36.
- [34] Hansen A, Bi P, Nitschke M, et al. Perceptions of heat-susceptibility in older persons: barriers to adaptation [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2011, 8(12): 4714-4728.

(编辑:徐苗蓁)

(上接第 115 页)

- LIANG Yahai, LI Jinmei, PENG Xiaoxia, et al. The prognostic value of serum LncRNA MALAT1 and microRNA-124 levels in non-small cell lung cancer patients [J]. *Journal of Modern Oncology*, 2024, 32(7): 1254-1259.
- [29] 张建树, 张瀚文, 赵文静. 长链非编码 RNA ZNF528-AS1 促进乳腺癌他莫昔芬耐药及进展转移 [J]. *山东大学学报(医学版)*, 2023, 61(1): 17-26.
- ZHANG Jianshu, ZHANG Hanwen, ZHAO Wenjing. LncRNA ZNF528-AS1 promotes tamoxifen resistance and progression of breast cancer [J]. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 2023, 61(1): 17-26.
- [30] 孙永康, 颜学波, 朱泽民, 等. 长链非编码 RNA MALAT1 在肝细胞癌发生发展中的作用 [J]. *临床肝胆病杂志*, 2021, 37(3): 704-708.
- SUN Yongkang, YAN Xuebo, ZHU Zemin, et al. Role of long non-coding RNA MALAT1 in the development and progression of hepatocellular carcinoma [J]. *Journal of Clinical Hepatology*, 2021, 37(3): 704-708.
- [31] 郭向阳, 苗立峰, 张国琛. 血清外泌体 SUMO1P3 和 MALAT1 对三阴性乳腺癌患者术后复发转移的预测价值 [J]. *临床肿瘤学杂志*, 2024, 29(6): 561-565.
- GUO Xiangyang, MIAO Lifeng, ZHANG Guochen. The predictive value of serum exosome SUMO1P3 and MALAT1 for postoperative recurrence and metastasis in patients with triple-negative breast cancer [J]. *Chinese Clinical Oncology*, 2024, 29(6): 561-565.

(编辑:徐苗蓁)