

· 专题报道 —— 关注空气质量，保护个人健康 ·

极端高温天气与宜昌市居民非意外死亡关系时间分层病例交叉分析

明小燕¹, 韩阳², 杨忠诚¹, 王早霞¹, 谢曙光³, 范传刚³

1. 宜昌市疾病预防控制中心, 宜昌 443005;

2. 赤壁市疾病预防控制中心, 赤壁 437399;

3. 湖北省疾病预防控制中心, 武汉 430079

通信作者: 范传刚, E-mail: fchglion@126.com

【摘要】目的 分析极端高温天气与湖北省宜昌市居民非意外死亡的关系, 为降低居民非意外死亡的风险提供参考依据。**方法** 收集宜昌市疾病预防控制中心死因系统记录的宜昌市城区 2014 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日 46 170 例非意外死亡者的相关数据以及同期宜昌市城区 5 个国控环境空气质量自动监测站每日的污染物监测数据和城区气象数据, 采用时间分层病例交叉设计通过条件 logistic 回归模型分析温度不低于研究期间平均温度的 $P_{92.5}$ 且持续 1 d ($P_{92.5}-1$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{92.5}$ 且持续 2 d ($P_{92.5}-2$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{92.5}$ 且持续 3 d ($P_{92.5}-3$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{95.0}$ 且持续 1 d ($P_{95.0}-1$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{95.0}$ 且持续 2 d ($P_{95.0}-2$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{95.0}$ 且持续 3 d ($P_{95.0}-3$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{97.5}$ 且持续 1 d ($P_{97.5}-1$ d)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{97.5}$ 且持续 2 d ($P_{97.5}-2$ d) 和温度不低于研究期间平均温度的 $P_{97.5}$ 且持续 3 d ($P_{97.5}-3$ d) 共 9 种极端高温事件对宜昌市居民非意外死亡风险的影响。**结果** 湖北省宜昌市 46 170 例非意外死亡者的病例天数为 46 170 d, 匹配的对照天数为 157 134 d; 宜昌市 46 170 例非意外死亡者中, $P_{92.5}-1$ d 死亡 3 371 例 (7.30%), $P_{92.5}-2$ d 死亡 3 041 例 (6.59%), $P_{92.5}-3$ d 死亡 2 597 例 (5.62%), $P_{95.0}-1$ d 死亡 2 436 例 (5.28%), $P_{95.0}-2$ d 死亡 2 205 例 (4.78%), $P_{95.0}-3$ d 死亡 1 960 例 (4.25%), $P_{97.5}-1$ d 死亡 1 343 例 (2.91%), $P_{97.5}-2$ d 死亡 1 148 例 (2.49%), $P_{97.5}-3$ d 死亡 882 例 (1.91%); 在排除了湿度 (RH)、细颗粒物 ($PM_{2.5}$)、可吸入颗粒物 (PM_{10})、二氧化硫 (SO_2)、二氧化氮 (NO_2)、臭氧 (O_3)、一氧化碳 (CO) 以及死亡者性别、年龄等因素的影响后, 时间分层病例交叉分析结果显示, $P_{92.5}-1$ d、 $P_{92.5}-2$ d、 $P_{92.5}-3$ d、 $P_{95.0}-1$ d、 $P_{95.0}-2$ d、 $P_{95.0}-3$ d、 $P_{97.5}-1$ d、 $P_{97.5}-2$ d 和 $P_{97.5}-3$ d 等 9 种极端高温事件均与宜昌市居民非意外死亡风险呈正相关且关联具有滞后性, 除 $P_{92.5}-2$ d 和 $P_{92.5}-3$ d 极端高温事件的作用持续到 Lag3 d 外, 其他 7 种极端高温事件的作用均持续到 Lag1 d, 9 种极端高温事件均以 Lag0 d 的效应值为最大, 分别为 $P_{92.5}-1$ d ($OR = 1.09$, $95\%CI = 1.04 \sim 1.14$)、 $P_{92.5}-2$ d ($OR = 1.08$, $95\%CI = 1.03 \sim 1.14$)、 $P_{92.5}-3$ d ($OR = 1.11$, $95\%CI = 1.05 \sim 1.16$)、 $P_{95.0}-1$ d ($OR = 1.15$, $95\%CI = 1.09 \sim 1.22$)、 $P_{95.0}-2$ d ($OR = 1.17$, $95\%CI = 1.10 \sim 1.24$)、 $P_{95.0}-3$ d ($OR = 1.17$, $95\%CI = 1.10 \sim 1.25$)、 $P_{97.5}-1$ d ($OR = 1.23$, $95\%CI = 1.15 \sim 1.32$)、 $P_{97.5}-2$ d ($OR = 1.27$, $95\%CI = 1.18 \sim 1.38$) 和 $P_{97.5}-3$ d ($OR = 1.31$, $95\%CI = 1.19 \sim 1.43$); 分层分析结果显示, 极端高温事件对宜昌市居民非意外死亡的影响在性别亚组和年龄亚组中依然存在, 男性和女性居民均以 $P_{97.5}-3$ d 的 Lag0 d 效应值为最大, 分别为男性 ($OR = 1.36$, $95\%CI = 1.21 \sim 1.54$) 和女性 ($OR = 1.24$, $95\%CI = 1.08 \sim 1.43$), 高龄组居民对极端高温事件更为敏感, $P_{92.5}-1$ d、 $P_{92.5}-2$ d 和 $P_{92.5}-3$ d 极端高温事件仅对 70~79 岁和 ≥ 80 岁年龄组居民非意外死亡有显著影响, $P_{92.5}-1$ d 在 Lag0 d 的效应值分别为 70~79 岁 ($OR = 1.17$, $95\%CI = 1.06 \sim 1.29$) 和 ≥ 80 岁 ($OR = 1.19$, $95\%CI = 1.10 \sim 1.29$), $P_{92.5}-2$ d 在 Lag0 d 的效应值分别为 70~79 岁 ($OR = 1.15$, $95\%CI = 1.05 \sim 1.28$) 和 ≥ 80 岁 ($OR = 1.22$, $95\%CI = 1.12 \sim 1.32$), $P_{92.5}-3$ d 在 Lag0 d 的效应值分别为 70~79 岁 ($OR = 1.15$, $95\%CI = 1.04 \sim 1.29$) 和 ≥ 80 岁 ($OR = 1.23$, $95\%CI = 1.13 \sim 1.34$)。 **结论** 极端高温天气可增加宜昌市居民非意外死亡的风险。

【关键词】 非意外死亡; 极端高温; 关系; 时间分层病例交叉分析; 宜昌市

Association of extreme high temperature weather with non-accidental deaths among residents of Yichang city: a time-stratified case-crossover analysis

MING Xiaoyan¹, HAN Yang², YANG Zhongcheng¹, WANG Zaoxia¹, XIE Shuguang³, FAN Chuangang³ (1. Yichang Center for Disease Control and Prevention, Yichang 443005, China; 2. Chibi Center for Disease Control and Prevention, Chibi 437399, China; 3. Hubei Provincial Center for Disease Control and Prevention, Wuhan 430079, China)

Corresponding author: FAN Chuangang, E-mail: fchgion@126.com

【Abstract】 Objective To analyze the correlation between extreme high temperature weather and non-accidental deaths among residents in Yichang city, Hubei province, and to provide a reference for reducing the risk of non-accidental deaths. **Methods** Data on 46 170 non-accidental deaths in urban areas of Yichang from 2014 to 2022 were collected from the death registration system of the Yichang Center for Disease Control and Prevention. Daily air pollution monitoring data from five national automatic air quality monitoring stations, as well as urban meteorological data during the same period, were also collected. A time-stratified case-crossover design with a conditional logistic regression model was used to analyze the effects of nine extreme high temperature events on the risk of non-accidental death among Yichang residents. These events included daily mean ambient air temperatures not lower than the 92.5th/95.0th/97.5th percentile during the study period and lasting 1, 2, or 3 days, abbreviated as $P_{92.5/95.0/97.5-1/2/3}$ d. **Results** The analysis included 46 170 case days and 157 134 matched control days. Of the 46 170 non-accidental deaths registered during the period, 3 371 (7.30%) occurred during the $P_{92.5-1}$ d event, followed by 3 041 (6.59%) during $P_{92.5-2}$ d, 2 597 (5.62%) during $P_{92.5-3}$ d, 2 436 (5.28%) during $P_{95.0-1}$ d, 2 205 (4.78%) during $P_{95.0-2}$ d, 1 960 (4.25%) during $P_{95.0-3}$ d, 1 343 (2.91%) during $P_{97.5-1}$ d, 1 148 (2.49%) during $P_{97.5-2}$ d, and 882 (1.91%) during $P_{97.5-3}$ d, respectively. After controlling for relative humidity (RH), fine particulate matter ≤ 2.5 μm in aerodynamic diameter ($\text{PM}_{2.5}$), inhalable particulate matter ≤ 10 μm in aerodynamic diameter (PM_{10}), sulfur dioxide (SO_2), nitrogen dioxide (NO_2), ozone (O_3), carbon monoxide (CO), and the gender and age of the deceased, the time-stratified case-crossover analysis showed that all nine extreme high temperature events were positively correlated with increased risk of non-accidental deaths among Yichang residents, with a lag effect. Except for the $P_{92.5-2}$ d and $P_{92.5-3}$ d events, which lasted until lag day 3, the effects of the other seven extreme high temperature events lasted until lag day 1. The maximum effect values for all nine extreme high temperature events were at lag day 0, with odds ratios (OR) and their 95% confidence intervals (CI) of 1.09 (1.04 – 1.14) for $P_{92.5-1}$ d, 1.08 (1.03 – 1.14) for $P_{92.5-2}$ d, 1.11 (1.05 – 1.16) for $P_{92.5-3}$ d, 1.15 (1.09 – 1.22) for $P_{95.0-1}$ d, 1.17, (1.10 – 1.24) for $P_{95.0-2}$ d, 1.17 (1.10 – 1.25) for $P_{95.0-3}$ d, 1.23 (1.15 – 1.32) for $P_{97.5-1}$ d, 1.27 (1.18 – 1.38) for $P_{97.5-2}$ d, and 1.31(1.19 – 1.43) for $P_{97.5-3}$ d. Stratified analysis showed that the effects of extreme high temperature events on non-accidental deaths persisted in different sex and age subgroups. For both male and female subgroups, the effect of $P_{97.5-3}$ d was strongest at lag day 0, with ORs (95%CI) of 1.36 (1.21 – 1.54) for males and 1.24 (1.08 – 1.43) for females. Older residents were more sensitive to extreme high temperature events. The $P_{92.5-1}$ d, $P_{92.5-2}$ d, and $P_{92.5-3}$ d events had significant effects on non-accidental deaths only in residents aged 70 – 79 and ≥ 80 years, with the ORs (95%CI) of 1.17 (1.06 – 1.29) and 1.19 (1.10 – 1.29) for $P_{92.5-1}$ d at lag day 0 for residents aged 70 – 79 and ≥ 80 years, followed by 1.15 (1.05 – 1.28) and 1.19 (1.10 – 1.29) for $P_{92.5-2}$ d, 1.15 (1.04 – 1.29) and 1.23 (1.13 – 1.34) for $P_{92.5-3}$ d. **Conclusion** Extremely high temperatures may increase the risk of non-accidental deaths among Yichang residents.

【 Keywords】 non-accidental death; extreme high temperature; relationship; time-stratified case-crossover analysis; Yichang city

近年来,极端高温天气已成为全球关注的重点公共卫生问题之一,在2019年全球疾病负担研究中,不适宜气温已经居于死亡危险因素的第10位,每年约可造成195万人的过早死亡^[1]。联合国2022年发布的全球气候变化第6次评估报告《气候变化2022:影响、适应和脆弱性》中亦明确指出:未来几十年全球所有地区都将面临气候变化加剧的问题,暖季变得更长、冷季更短,极端高温等极端天气将变得更加频繁,给人类健康带来更大的挑战^[2]。目前已有研究报道了极端高温对人群死亡风险的影响,如Amirkhani M等^[3]通

过研究1999—2018年全球极端天气相关事件与死亡人数之间的关系发现高温季节死亡率为寒冷/严冬季节的6.82倍($IRR=6.82$, $95\%CI=6.68\sim 6.96$),但该研究未能获取极端天气的持续时间,且未考虑极端高温的持续效应。Yin P等^[4]通过病例交叉研究发现高温与神经退行性疾病死亡风险的增加有关,并预计21世纪中期后可归因死亡风险将继续增加,但该研究也存在一定的局限性,如未考虑同期空气污染物的影响等。已有研究表明,细颗粒物(particulate matter ≤ 2.5 μm in aerodynamic diameter, $\text{PM}_{2.5}$)、二氧化硫(sulfur dioxide, SO_2)和

臭氧(ozone, O₃)等空气污染物与暴露人群死亡风险的升高有显著性关联^[5-7],李静等^[8]在北京市昌平区通过时间序列研究发现热效应在累积滞后 4 d 时,温度每升高 1 °C,人群非意外死亡的累计超额死亡率为 0.030%(95%CI = 0.011%~0.049%),但该研究仅覆盖了昌平区,且时间序列方法存在个体水平混杂因素残余偏差的影响^[4]。因此,为了提供更多准确的极端高温天气与人群死亡风险的环境流行病学资料,本研究在中国中部城市湖北省宜昌市通过当地疾病预防控制中心死因系统收集了 2014 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日报告的 46 170 例非意外死亡者的相关数据以及同期宜昌市城区 5 个国控环境空气质量自动监测站每日的污染物监测数据和城区气象数据,采用时间分层病例交叉设计通过条件 logistic 回归模型分析温度不低于研究期间平均温度的 $P_{92.5}$ 且持续 1 d($P_{92.5}-1\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{92.5}$ 且持续 2 d($P_{92.5}-2\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{92.5}$ 且持续 3 d($P_{92.5}-3\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{95.0}$ 且持续 1 d($P_{95.0}-1\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{95.0}$ 且持续 2 d($P_{95.0}-2\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{95.0}$ 且持续 3 d($P_{95.0}-3\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{97.5}$ 且持续 1 d($P_{97.5}-1\text{d}$)、温度不低于研究期间平均温度的 $P_{97.5}$ 且持续 2 d($P_{97.5}-2\text{d}$)和温度不低于研究期间平均温度的 $P_{97.5}$ 且持续 3 d($P_{97.5}-3\text{d}$)共 9 种极端高温事件对宜昌市居民非意外死亡风险的影响。结果报告如下。

1 资料与方法

1.1 资料来源 收集宜昌市疾病预防控制中心死因系统记录的宜昌市城区 2014 年 1 月 1 日—2022 年 12 月 31 日 46 170 例非意外死亡者的相关数据,排除根本死亡原因为损伤、中毒或其他意外因素者的数据,内容包括性别、年龄、死亡时间和根本死亡原因,不包含姓名、身份证号码、家庭住址等涉及个人隐私的数据;同期气象资料从湖北省气象局(<http://hb.cma.gov.cn/>)公布信息中获取,主要包括宜昌市城区每日平均温度(temperature, T)和相对湿度(relative humidity, RH)的信息;同期空气污染数据来源于全国城市空气质量实时发布平台(<https://air.cnemc.cn:18007/>)公布的宜昌市城区 5 个国控环境空气质量自动监测站数据,包括 PM_{2.5}、可吸入颗粒物(particulate matter ≤ 10 μm in aerodynamic diameter, PM₁₀)、SO₂、二氧化氮(nitrogen dioxide, NO₂)、O₃ 和一氧化碳(carbon monoxide, CO)8 h 的日平均浓度数据,以各监测点数据计算城区平均浓度作为每个研究对象的

空气污染物暴露浓度。本研究为回顾性研究,无任何对象个人特征信息暴露,符合赫尔辛基宣言的伦理准则。

1.2 极端高温事件定义 鉴于目前国际上对热浪事件尚未有标准定义,本研究在借鉴已有研究^[9]的基础上结合宜昌市中部山区临江城市的气候特点,将 $P_{92.5}-1\text{d}$ 、 $P_{92.5}-2\text{d}$ 、 $P_{92.5}-3\text{d}$ 、 $P_{95.0}-1\text{d}$ 、 $P_{95.0}-2\text{d}$ 、 $P_{95.0}-3\text{d}$ 、 $P_{97.5}-1\text{d}$ 、 $P_{97.5}-2\text{d}$ 和 $P_{97.5}-3\text{d}$ 定义为极端高温事件,研究期间宜昌市城区平均温度的 $P_{92.5}$ 、 $P_{95.0}$ 和 $P_{97.5}$ 温度值分别为 28.2、29.0 和 30.1 °C。

1.3 统计分析 采用时间分层病例交叉方法通过条件 logistic 回归模型分析 $P_{92.5}-1\text{d}$ 、 $P_{92.5}-2\text{d}$ 、 $P_{92.5}-3\text{d}$ 、 $P_{95.0}-1\text{d}$ 、 $P_{95.0}-2\text{d}$ 、 $P_{95.0}-3\text{d}$ 、 $P_{97.5}-1\text{d}$ 、 $P_{97.5}-2\text{d}$ 和 $P_{97.5}-3\text{d}$ 等 9 种极端高温事件与宜昌市居民非意外死亡的关系,统计软件为 R 4.1.2 软件,检验水准为双侧检验 $\alpha = 0.05$ 。时间分层病例交叉研究方法的主要特点是以不同时间段的自身为对照,能够有效控制传统病例对照研究中病例和对照的各种混杂因素的影响,被广泛应用于分析大气污染物对人群各种健康结局的急性影响,在本研究中,将死亡当天的非意外死亡对象定义为病例,将同年、同月和同星期其他日期的研究对象定义为该病例的对照,通过时间分层能有效控制时间长期趋势、季节和星期几效应等^[10-11]。由于极端高温对健康的影响存在短期滞后效应,本研究分析了极端高温事件对居民非意外死亡风险最长 6 d(Lag0 d~Lag6 d)的滞后效应,并按照性别和年龄分别进行了亚组分析。本研究构建的条件 logistic 回归模型如下: $\log[E(y_t)] = \alpha + \beta_1 E_t + \beta_2 \text{PM}_{2.5t} + \beta_3 \text{SO}_{2t} + \beta_4 \text{O}_{3t} + \text{NS}(\text{RH}_t, 3) + \text{stratum}_t$, 其中, y_t : 观察日 t 研究对象是否死亡,取值为 0(未死亡/对照)或 1(死亡/病例), $E(y_t)$ 为研究对象是否死亡的期望值; α 为模型得到的截距; β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 分别为极端高温 E 、PM_{2.5}、SO₂ 和 O₃ 的模型回归系数; E_t 为观察日 t 极端高温是否发生(0 = 未发生, 1 = 发生); PM_{2.5t}、SO_{2t} 和 O_{3t} 为观察日 t 的相应污染物日均浓度; NS 为自然样条函数, RH _{t} 为观察日 t 的日平均相对湿度,其自由度取值为 3; stratum _{t} 为与观察日 t 匹配的某对象同年同月同星期的时间分层变量。

2 结果

2.1 基本情况(表 1) 共纳入 46 170 例非意外死亡者,病例天数为 46 170 d,匹配的对照天数为 157 134 d。46 170 例非意外死亡者中,男性 27 342 例(59.22%),女性 18 828 例(40.78%);年龄 < 60 岁 7 426 例(16.08%),60~69 岁 8 274 例(17.92%),70~

80 岁 12 411 例 (26.88%), ≥80 岁 18 059 例 (39.11%); $P_{92.5}-1$ d 死亡 3 371 例 (7.30%), $P_{92.5}-2$ d 死亡 3 041 例 (6.59%), $P_{92.5}-3$ d 死亡 2 597 例 (5.62%), $P_{95.0}-1$ d 死亡 2 436 例 (5.28%), $P_{95.0}-2$ d 死亡 2 205 例 (4.78%), $P_{95.0}-3$ d 死亡 1 960 例 (4.25%), $P_{97.5}-$

1 d 死亡 1 343 例 (2.91%), $P_{97.5}-2$ d 死亡 1 148 例 (2.49%), $P_{97.5}-3$ d 死亡 882 例 (1.91%), 其他死亡 27 187 例 (58.88%)。病例日与对照日比较, RH 和 $PM_{2.5}$ 的日平均浓度差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。

表 1 病例日与对照日气象因素和大气污染物分布情况比较($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Differences ($\bar{x} \pm s$) in daily mean temperature, relative humidity, and daily mean concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3 , and CO between case days and control days in Yichang city, Hubei province, 2014 – 2022

项目	病例日	对照日	t 值	P 值
T(°C)	15.92 ± 8.55	15.96 ± 8.48	0.840	0.401
RH(%)	75.00 ± 14.86	75.18 ± 14.83	2.250	0.024
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	60.08 ± 46.04	59.50 ± 46.18	-2.351	0.019
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	88.05 ± 55.51	87.60 ± 55.82	-1.538	0.124
SO_2 ($\mu g/m^3$)	17.11 ± 18.90	17.07 ± 18.85	-0.404	0.686
NO_2 ($\mu g/m^3$)	30.67 ± 11.17	30.61 ± 11.10	-1.060	0.289
O_3 ($\mu g/m^3$)	81.71 ± 38.39	81.32 ± 38.46	-1.897	0.058
CO(mg/m^3)	0.95 ± 0.38	0.94 ± 0.38	-1.809	0.070

2.2 极端高温事件与宜昌市居民非意外死亡的关系(表 2) 在排除了 RH、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO 以及死亡者性别、年龄等因素的影响后, 时间分层病例交叉分析结果显示, $P_{92.5}-1$ d、 $P_{92.5}-2$ d、 $P_{92.5}-3$ d、 $P_{95.0}-1$ d、 $P_{95.0}-2$ d、 $P_{95.0}-3$ d、 $P_{97.5}-1$ d、 $P_{97.5}-2$ d 和 $P_{97.5}-3$ d 等 9 种极端高温事件均与宜

昌市居民非意外死亡风险呈正相关且关联具有滞后性, 除 $P_{92.5}-2$ d 和 $P_{92.5}-3$ d 极端高温事件的作用持续到 Lag3 d 外, 其他 7 种极端高温事件的作用均持续到 Lag1 d, 9 种极端高温事件均以 Lag0 d 的效应值为最大。

表 2 9 种极端高温事件与宜昌市居民非意外死亡关系时间分层病例交叉分析

Table 2 Associations of extreme high temperature events (The abbreviation of $P_{92.5}-1$ d indicates the daily mean temperature not lower than that of the 92.5th percentile continuously for one day, and the meanings of the following abbreviations are the same as those of $P_{92.5}-1$ d) with risks (odds ratio and its 95% confidence interval) of daily non-accidental deaths by lag days (lag day 0 – 6 [Lag0 – 6 d]) for residents of Yichang city, 2014 – 2022: time-stratified case-crossover analysis of death registry, meteorological, and air pollution monitoring data (Note: Adjusted for daily relative humidity and daily mean concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3 , and CO, as well as gender and age at death)

极端高温事件	Lag0 d		Lag1 d		Lag2 d		Lag3 d		Lag4 d		Lag5 d		Lag6 d	
	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI
$P_{92.5}-1$ d	1.09	1.04~1.14	1.06	1.01~1.11	1.04	0.99~1.09	1.04	0.99~1.09	1.02	0.98~1.07	1.02	0.97~1.07	0.98	0.94~1.03
$P_{92.5}-2$ d	1.08	1.03~1.14	1.06	1.01~1.11	1.05	0.97~1.07	1.04	1.00~1.10	1.02	0.97~1.07	1.01	0.96~1.06	0.98	0.93~1.02
$P_{92.5}-3$ d	1.11	1.05~1.16	1.07	1.02~1.13	1.06	0.99~1.09	1.07	1.02~1.13	1.04	0.99~1.09	1.03	0.98~1.08	0.99	0.94~1.04
$P_{95.0}-1$ d	1.15	1.09~1.22	1.10	1.04~1.16	1.02	0.98~1.10	1.03	0.98~1.09	1.04	0.98~1.10	1.05	0.99~1.11	1.03	0.97~1.09
$P_{95.0}-2$ d	1.17	1.10~1.24	1.11	1.05~1.18	1.02	0.97~1.09	1.03	0.97~1.09	1.03	0.97~1.09	1.03	0.97~1.09	1.02	0.96~1.09
$P_{95.0}-3$ d	1.17	1.10~1.25	1.11	1.05~1.18	1.04	0.97~1.10	1.06	0.99~1.13	1.03	0.97~1.10	1.05	0.99~1.12	1.03	0.97~1.10
$P_{97.5}-1$ d	1.23	1.15~1.32	1.14	1.06~1.22	1.06	0.94~1.08	1.00	0.93~1.08	1.01	0.94~1.08	0.98	0.91~1.05	1.01	0.94~1.09
$P_{97.5}-2$ d	1.27	1.18~1.38	1.19	1.10~1.28	1.05	0.93~1.08	0.99	0.92~1.07	1.00	0.93~1.08	0.98	0.91~1.06	0.98	0.91~1.06
$P_{97.5}-3$ d	1.31	1.19~1.43	1.16	1.06~1.27	1.04	0.89~1.08	0.97	0.89~1.07	0.98	0.89~1.08	0.98	0.89~1.07	0.98	0.89~1.07

注: 表中结果均为排除了 RH、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO 以及死亡者性别、年龄等因素影响后的结果。

2.3 亚组分析(表 3、4) 在性别亚组中, 在排除了 RH、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO 和死亡者年龄等因素的影响后, 时间分层病例交叉分析结果显示, 极端高温事件对宜昌市居民非意外死亡的影响在性别亚组和年龄亚组中依然存在, 其中男性和女性居民均以 $P_{97.5}-3$ d 的 Lag0 d 效应值为最大, 不同定义极端高温事件男性居民非意外死亡风险总体高于女性居民, 但效应差异并不显

著(见表 3); 在年龄亚组中, 在排除了 RH、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO 和死亡者性别等因素的影响后, 时间分层病例交叉分析结果显示, 高年龄组居民对极端高温事件更为敏感, $P_{92.5}-1$ d、 $P_{92.5}-2$ d 和 $P_{92.5}-3$ d 极端高温事件仅对 70~79 岁和 ≥80 岁年龄组居民非意外死亡有显著影响(见表 4)。

表 3 9 种极端高温事件与宜昌市不同性别居民非意外死亡关系时间分层病例交叉分析

Table 3 Gender-specific associations of extreme high temperature events (The abbreviation of $P_{92.5-1 d}$ indicates the daily mean temperature not lower than that of the 92.5th percentile continuously for one day, and the meanings of the following abbreviations are the same as those of $P_{92.5-1 d}$) with risks (odds ratio and its 95% confidence interval) of daily non-accidental deaths by lag days (lag day 0 – 6 [Lag0 – 6 d]) for residents of Yichang city, 2014 – 2022: time-stratified case-crossover analysis of death registry, meteorological, and air pollution monitoring data (Note: Adjusted for daily relative humidity and daily mean concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3 , and CO, as well as age at death)

性别	极端高温事件	Lag0 d		Lag1 d		Lag2 d		Lag3 d		Lag4 d		Lag5 d		Lag6 d	
		OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI
男性	$P_{92.5-1 d}$	1.12	1.05~1.20	1.06	1.00~1.13	1.04	0.98~1.11	1.07	1.00~1.14	1.07	1.01~1.15	1.05	0.99~1.13	0.98	0.92~1.05
	$P_{92.5-2 d}$	1.14	1.07~1.22	1.07	1.00~1.14	1.04	0.97~1.11	1.07	1.00~1.14	1.08	1.02~1.16	1.07	1.00~1.14	0.99	0.93~1.06
	$P_{92.5-3 d}$	1.16	1.08~1.24	1.10	1.02~1.18	1.07	1.00~1.15	1.09	1.01~1.17	1.07	1.00~1.15	1.07	1.00~1.15	1.01	0.94~1.08
	$P_{95.0-1 d}$	1.19	1.11~1.28	1.10	1.02~1.18	1.05	0.98~1.13	1.05	0.97~1.13	1.08	1.00~1.16	1.09	1.01~1.18	1.04	0.97~1.12
	$P_{95.0-2 d}$	1.20	1.11~1.30	1.13	1.04~1.22	1.05	0.98~1.14	1.05	0.98~1.14	1.07	1.00~1.16	1.07	0.99~1.15	1.03	0.95~1.11
	$P_{95.0-3 d}$	1.20	1.11~1.30	1.14	1.05~1.23	1.07	0.99~1.16	1.09	1.00~1.18	1.09	1.00~1.18	1.09	1.00~1.18	1.05	0.97~1.14
	$P_{97.5-1 d}$	1.27	1.16~1.39	1.19	1.09~1.30	1.09	0.99~1.20	1.01	0.92~1.11	1.03	0.94~1.13	1.03	0.94~1.13	1.03	0.94~1.13
	$P_{97.5-2 d}$	1.33	1.20~1.47	1.25	1.13~1.38	1.10	0.99~1.21	1.01	0.91~1.12	1.06	0.96~1.18	1.04	0.94~1.15	1.00	0.90~1.11
	$P_{97.5-3 d}$	1.36	1.21~1.54	1.23	1.09~1.38	1.11	0.99~1.26	1.01	0.90~1.14	1.04	0.92~1.18	1.04	0.92~1.18	1.02	0.90~1.15
女性	$P_{92.5-1 d}$	1.11	1.03~1.20	1.13	1.05~1.22	0.98	0.91~1.06	1.00	0.92~1.07	1.02	0.95~1.10	1.03	0.96~1.12	1.00	0.93~1.09
	$P_{92.5-2 d}$	1.12	1.03~1.22	1.09	1.01~1.18	0.99	0.91~1.07	0.99	0.91~1.07	1.02	0.94~1.10	1.04	0.96~1.12	1.01	0.93~1.09
	$P_{92.5-3 d}$	1.11	1.01~1.21	1.08	0.99~1.18	1.00	0.92~1.09	1.02	0.94~1.11	1.00	0.92~1.08	1.01	0.92~1.09	1.00	0.92~1.09
	$P_{95.0-1 d}$	1.11	1.02~1.21	1.12	1.02~1.22	0.98	0.90~1.07	1.02	0.93~1.11	1.00	0.91~1.09	0.99	0.91~1.09	1.01	0.93~1.10
	$P_{95.0-2 d}$	1.13	1.03~1.24	1.10	1.00~1.21	0.99	0.90~1.08	1.00	0.91~1.10	0.97	0.88~1.06	0.99	0.90~1.08	1.01	0.92~1.11
	$P_{95.0-3 d}$	1.14	1.04~1.26	1.09	0.99~1.20	1.01	0.91~1.11	1.03	0.93~1.13	0.96	0.87~1.06	1.01	0.92~1.11	1.01	0.91~1.11
	$P_{97.5-1 d}$	1.19	1.06~1.32	1.07	0.95~1.19	1.02	0.91~1.14	1.00	0.89~1.12	0.97	0.87~1.09	0.90	0.81~1.01	0.99	0.89~1.11
	$P_{97.5-2 d}$	1.22	1.08~1.37	1.12	0.99~1.26	1.01	0.89~1.14	0.98	0.87~1.11	0.93	0.82~1.05	0.90	0.80~1.02	0.96	0.85~1.08
	$P_{97.5-3 d}$	1.24	1.08~1.43	1.08	0.93~1.24	0.95	0.82~1.09	0.93	0.81~1.07	0.91	0.79~1.05	0.91	0.79~1.04	0.93	0.81~1.07

注: 表中结果均为排除了RH、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、CO和死亡者年龄等因素影响后的结果。

表 4 9 种极端高温事件与宜昌市不同年龄居民非意外死亡关系时间分层病例交叉分析

Table 4 Age-group-specific associations of extreme high temperature events (The abbreviation of $P_{92.5-1 d}$ indicates the daily mean temperature not lower than that of the 92.5th percentile continuously for one day, and the meanings of the following abbreviations are the same as those of $P_{92.5-1 d}$) with risks (odds ratio and its 95% confidence interval) of daily non-accidental deaths by lag days (lag day 0 – 6 [Lag0 – 6 d]) for residents of Yichang city, 2014 – 2022: time-stratified case-crossover analysis of death registry, meteorological, and air pollution monitoring data (Note: Adjusted for daily relative humidity and daily mean concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3 , and CO, as well as gender of the deaths)

年龄(岁)	极端高温事件	Lag0 d		Lag1 d		Lag2 d		Lag3 d		Lag4 d		Lag5 d		Lag6 d	
		OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI
<60	$P_{92.5-1 d}$	1.04	0.92~1.17	1.00	0.88~1.13	1.00	0.89~1.13	1.09	0.97~1.23	0.97	0.86~1.10	1.00	0.89~1.13	0.93	0.83~1.06
	$P_{92.5-2 d}$	1.08	0.95~1.23	0.97	0.86~1.10	1.00	0.89~1.13	1.09	0.97~1.23	0.97	0.86~1.10	1.01	0.89~1.14	0.95	0.83~1.07
	$P_{92.5-3 d}$	1.11	0.97~1.27	1.05	0.92~1.20	1.00	0.87~1.14	1.08	0.95~1.23	0.98	0.86~1.12	1.00	0.88~1.14	0.93	0.82~1.07
	$P_{95.0-1 d}$	1.10	0.95~1.26	1.05	0.92~1.21	1.00	0.87~1.15	1.03	0.90~1.18	1.00	0.87~1.15	1.09	0.94~1.25	0.98	0.85~1.13
	$P_{95.0-2 d}$	1.14	0.99~1.32	1.09	0.95~1.26	1.00	0.87~1.16	1.03	0.89~1.19	1.01	0.88~1.17	1.00	0.86~1.16	0.94	0.81~1.09
	$P_{95.0-3 d}$	1.13	0.97~1.32	1.02	0.88~1.19	0.97	0.84~1.14	1.04	0.90~1.21	1.06	0.91~1.23	1.09	0.94~1.27	0.95	0.82~1.11
	$P_{97.5-1 d}$	1.22	1.03~1.45	1.23	1.03~1.45	1.02	0.85~1.22	0.94	0.79~1.12	1.01	0.84~1.20	0.95	0.79~1.13	1.02	0.86~1.22
	$P_{97.5-2 d}$	1.31	1.09~1.58	1.25	1.04~1.51	1.06	0.87~1.28	0.95	0.78~1.15	0.92	0.75~1.12	0.92	0.75~1.12	0.98	0.80~1.19
	$P_{97.5-3 d}$	1.27	1.01~1.59	1.06	0.84~1.33	1.00	0.79~1.26	0.97	0.77~1.22	0.88	0.69~1.11	0.87	0.68~1.10	0.97	0.77~1.22
60~69	$P_{92.5-1 d}$	0.97	0.86~1.09	0.96	0.85~1.08	0.95	0.85~1.07	1.01	0.90~1.13	1.09	0.97~1.22	1.13	1.01~1.27	1.04	0.93~1.17
	$P_{92.5-2 d}$	0.98	0.87~1.11	0.94	0.83~1.06	0.92	0.81~1.03	0.99	0.87~1.11	1.08	0.96~1.22	1.12	0.99~1.26	1.07	0.95~1.20
	$P_{92.5-3 d}$	0.95	0.83~1.08	0.91	0.79~1.03	0.92	0.81~1.05	1.01	0.89~1.15	1.06	0.94~1.21	1.11	0.98~1.26	1.08	0.96~1.23
	$P_{95.0-1 d}$	0.99	0.86~1.13	0.91	0.80~1.04	0.93	0.81~1.06	0.98	0.86~1.12	1.02	0.90~1.17	1.02	0.90~1.17	1.11	0.98~1.27
	$P_{95.0-2 d}$	0.94	0.81~1.08	0.93	0.81~1.07	0.87	0.76~1.01	0.98	0.85~1.13	1.01	0.88~1.17	1.05	0.92~1.21	1.13	0.99~1.29
	$P_{95.0-3 d}$	0.94	0.81~1.09	0.93	0.80~1.08	0.89	0.77~1.04	0.99	0.86~1.15	0.98	0.85~1.14	1.07	0.93~1.24	1.15	1.00~1.33
	$P_{97.5-1 d}$	0.99	0.83~1.17	0.90	0.76~1.08	0.93	0.78~1.10	0.94	0.79~1.12	0.92	0.77~1.09	0.87	0.74~1.04	0.91	0.76~1.08
	$P_{97.5-2 d}$	0.96	0.79~1.16	0.95	0.79~1.15	0.89	0.74~1.08	0.90	0.75~1.09	0.93	0.77~1.12	0.85	0.70~1.02	0.91	0.76~1.10
	$P_{97.5-3 d}$	0.97	0.77~1.21	0.90	0.71~1.13	0.88	0.70~1.10	0.81	0.65~1.02	0.79	0.62~0.99	0.81	0.64~1.02	0.96	0.77~1.19

续表 4
Table 4 Continued

年龄(岁) 极端高温事件	Lag0 d		Lag1 d		Lag2 d		Lag3 d		Lag4 d		Lag5 d		Lag6 d		
	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	OR 值	95%CI	
70~79	$P_{92.5-1d}$	1.17	1.06~1.29	1.09	0.99~1.20	1.04	0.95~1.15	1.06	0.97~1.17	1.04	0.94~1.14	0.99	0.90~1.09	0.96	0.88~1.06
	$P_{92.5-2d}$	1.15	1.05~1.28	1.10	1.00~1.22	1.06	0.96~1.17	1.07	0.97~1.18	1.05	0.96~1.16	1.01	0.91~1.11	0.94	0.85~1.04
	$P_{92.5-3d}$	1.15	1.04~1.29	1.14	1.03~1.27	1.12	1.01~1.25	1.09	0.98~1.21	1.03	0.93~1.14	1.02	0.92~1.13	0.96	0.86~1.07
	$P_{95.0-1d}$	1.15	1.03~1.28	1.10	0.99~1.23	1.06	0.95~1.18	1.04	0.93~1.16	1.05	0.94~1.17	1.03	0.92~1.14	1.04	0.93~1.16
	$P_{95.0-2d}$	1.19	1.06~1.33	1.11	0.99~1.24	1.07	0.96~1.20	1.05	0.94~1.18	1.03	0.92~1.15	1.03	0.92~1.15	1.02	0.91~1.15
	$P_{95.0-3d}$	1.22	1.08~1.38	1.13	1.00~1.28	1.09	0.97~1.23	1.11	0.98~1.25	1.04	0.93~1.18	1.04	0.92~1.17	1.04	0.93~1.18
	$P_{97.5-1d}$	1.21	1.06~1.39	1.11	0.97~1.27	1.08	0.94~1.24	1.01	0.88~1.16	1.03	0.90~1.19	1.05	0.92~1.21	1.05	0.91~1.20
	$P_{97.5-2d}$	1.29	1.11~1.49	1.18	1.02~1.37	1.07	0.92~1.25	1.04	0.90~1.21	1.07	0.93~1.25	1.07	0.92~1.24	1.02	0.88~1.19
	$P_{97.5-3d}$	1.37	1.15~1.63	1.26	1.06~1.51	1.09	0.91~1.30	1.08	0.90~1.28	1.13	0.95~1.34	1.12	0.94~1.33	1.06	0.89~1.26
≥80	$P_{92.5-1d}$	1.19	1.10~1.29	1.20	1.11~1.30	1.05	0.97~1.13	1.01	0.93~1.09	1.08	1.00~1.17	1.07	0.99~1.16	1.02	0.94~1.10
	$P_{92.5-2d}$	1.22	1.12~1.32	1.18	1.09~1.28	1.04	0.96~1.13	1.01	0.93~1.10	1.09	1.00~1.18	1.08	1.00~1.18	1.03	0.95~1.12
	$P_{92.5-3d}$	1.23	1.13~1.34	1.18	1.08~1.29	1.06	0.97~1.16	1.05	0.96~1.14	1.07	0.98~1.16	1.05	0.96~1.15	1.03	0.94~1.13
	$P_{95.0-1d}$	1.28	1.17~1.40	1.23	1.13~1.35	1.06	0.97~1.16	1.06	0.97~1.16	1.07	0.98~1.18	1.07	0.97~1.17	1.00	0.91~1.10
	$P_{95.0-2d}$	1.30	1.19~1.43	1.23	1.12~1.35	1.08	0.98~1.19	1.05	0.95~1.15	1.05	0.95~1.15	1.04	0.95~1.15	1.01	0.92~1.11
	$P_{95.0-3d}$	1.29	1.17~1.43	1.25	1.13~1.38	1.12	1.01~1.24	1.07	0.97~1.18	1.04	0.94~1.15	1.04	0.94~1.15	1.00	0.91~1.11
	$P_{97.5-1d}$	1.38	1.24~1.55	1.23	1.10~1.38	1.14	1.02~1.28	1.06	0.94~1.19	1.03	0.92~1.16	0.99	0.88~1.11	1.04	0.92~1.16
	$P_{97.5-2d}$	1.42	1.26~1.60	1.29	1.14~1.46	1.13	1.00~1.28	1.03	0.91~1.17	1.03	0.91~1.17	1.01	0.89~1.15	0.99	0.87~1.12
	$P_{97.5-3d}$	1.46	1.27~1.69	1.26	1.09~1.46	1.10	0.95~1.28	0.99	0.85~1.15	1.02	0.88~1.19	1.02	0.88~1.18	0.95	0.82~1.10

注:表中结果均为排除了RH、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO和死亡者性别等因素的影响后的结果。

3 讨论

本研究通过对宜昌市 2014—2022 年 46 170 例非意外死亡者相关数据的时间分层病例交叉分析发现,在排除了 RH、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 以及死亡者性别、年龄等因素的影响后, $P_{92.5-1d}$ 、 $P_{92.5-2d}$ 、 $P_{92.5-3d}$ 、 $P_{95.0-1d}$ 、 $P_{95.0-2d}$ 、 $P_{95.0-3d}$ 、 $P_{97.5-1d}$ 、 $P_{97.5-2d}$ 和 $P_{97.5-3d}$ 等 9 种极端高温事件均与宜昌市居民非意外死亡风险呈正相关,9 种极端高温事件均以 Lag0 d 的效应值为最大,分别为 $P_{92.5-1d}$ (OR=1.09, 95%CI=1.04~1.14)、 $P_{92.5-2d}$ (OR=1.08, 95%CI=1.03~1.14)、 $P_{92.5-3d}$ (OR=1.11, 95%CI=1.05~1.16)、 $P_{95.0-1d}$ (OR=1.15, 95%CI=1.09~1.22)、 $P_{95.0-2d}$ (OR=1.17, 95%CI=1.10~1.24)、 $P_{95.0-3d}$ (OR=1.17, 95%CI=1.10~1.25)、 $P_{97.5-1d}$ (OR=1.23, 95%CI=1.15~1.32)、 $P_{97.5-2d}$ (OR=1.27, 95%CI=1.18~1.38) 和 (OR=1.31, 95%CI=1.19~1.43)。

既往研究表明高温事件对暴露人群的死亡风险具有显著影响,栾桂杰等^[12]研究发现夏季高温与居民死亡之间存在关联性,夏季前期高温对死亡影响的 RR 值为 1.08~2.14,后期高温对死亡影响的 RR 值为 1.03~1.67,但该研究未能区分意外死亡的影响,如 He L 等^[13]研究表明高温可显著增加道路意外伤害的风险。本研究纳入的死亡者排除了根本死因为损伤、中毒或其他意外因

素的死亡者,提高了结果的准确性,与肖瑶^[14]研究方法一致。本研究发现极端高温天气暴露对宜昌市居民非意外死亡风险增加有显著滞后效应,且老年人群更为敏感,同时不同定义极端高温事件对居民非意外死亡效应的滞后时间亦存在差异性,除 $P_{92.5-2d}$ 和 $P_{92.5-3d}$ 极端高温事件的作用持续到 Lag3 d 外,其他 7 种极端高温事件的作用均持续到 Lag1 d,这与既往研究结果一致^[15-16]。牛彦麟等^[15]在北京市的研究发现不同定义下热浪所致的效应不同,热浪阈值温度为日均气温的 $P_{95}(27.6^{\circ}\text{C})$ 持续时间 $\geq 4d$ 时高温热浪对非意外死亡的效应最大,死亡风险可增加 11%(95%CI=4%~18%),其中中老年人群对高温热浪较为敏感;Xia TZ 等^[16]对四川省成都市老年居民死亡率和气温关系的研究发现,在 Lag0 d~Lag3 d 极端高温(日均气温 P_{99})可增加老年居民的非意外死亡风险(OR=1.22, 95%CI=1.17~1.28),其中 ≥ 85 岁老年居民更易受到影响。高温环境中,人体内的水分和盐分均随着汗液的蒸发快速流失,导致血液浓缩、血液黏性增高、血压下降和呼吸频次增加等,从而可增加心肺负担,诱发冠心病、脑卒中和慢性阻塞性肺疾病等突然发作或病情加重,进而增加死亡风险,特别是对老年人和有基础疾病的患者^[17]。但是在性别亚组分析中,研究结果存在较多分歧。牛彦麟等^[15]和 Xia YZ 等^[16]研究均表明女性人群更易受极端高温事件的影响,而徐丹丹等^[18]

研究发现上海市 2013—2015 年高温热浪期与非高温热浪期非意外死亡风险的增加值比较, 男性人群的增加值高于女性人群, 分别为 11.06%(95%CI = 4.30%~18.26%)和 6.83%(95%CI = 0.17%~13.94%); 李承程等^[19]在研究 1990—2019 年中国及全球归因于高温暴露的疾病负担时亦发现男性人群归因于高温暴露的人群归因分值、标化死亡率和伤残调整生命年等疾病负担指标均高于女性人群。本研究性别亚组分析结果显示, 不同定义极端高温事件男性居民非意外死亡风险总体高于女性居民, 但效应差异并不显著, 这与 Ren RR 等^[20]进行的一项 meta 分析结果一致。

综上所述, 极端高温事件可显著增加宜昌市居民非意外死亡的风险, 尤其是老年人的死亡风险更高, 建议相关部门加强高温天气危害的科普宣传及健康干预, 做好提示预警。本研究采用病例交叉设计, 避免了病例个体因素的影响, 并根据实际情况定义了 9 种极端高温事件, 全面分析了极端高温事件对死亡风险的影响, 此外还在分析模型中纳入了空气污染物, 排除了 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 和 CO 等混杂因素的影响, 因此本研究结果较为可靠。但仍在存在一定的局限性, 如研究使用的温度数据是湖北省气象局公布的数据, 而不是个体暴露的数据, 且本研究仅分析了宜昌市的情况, 研究结论的外推尚需进一步加以验证。

参考文献

- [1] GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *The Lancet*, 2020, 396(10258): 1223–1249.
- [2] IPCC. Sixth assessment report: impacts, adaption and vulnerability [R]. Geneva: IPCC, 2022.
- [3] Amirkhani M, Ghaemimood S, Von Schreeb J, et al. Extreme weather events and death based on temperature and CO₂ emission – a global retrospective study in 77 low-, middle- and high-income countries from 1999 to 2018[J]. *Preventive Medicine Reports*, 2022, 28: 101846.
- [4] Yin P, Gao Y, Chen RJ, et al. Temperature-related death burden of various neurodegenerative diseases under climate warming: a nationwide modelling study[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 8236.
- [5] Brunekreef B, Strak M, Chen J, et al. Mortality and morbidity effects of long-term exposure to low-level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: an analysis of European cohorts in the ELAPSE project[J]. *Research Report*, 2021, 2021(208): 1–127.
- [6] Zhang Y, Zhang SB, Xin JY, et al. Short-term joint effects of ambient PM_{2.5} and O₃ on mortality in Beijing, China[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1232715.
- [7] Orellano P, Reynoso J, Quaranta N. Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environment International*, 2021, 150: 106434.
- [8] 李静, 赵明强, 王焕新, 等. 北京市昌平区温度热效应对非意外死亡及寿命损失年影响的研究 [J]. *环境卫生学杂志*, 2019, 9(1): 43–48.
- [9] Xu RJ, Huang SL, Shi CX, et al. Extreme temperature events, fine particulate matter, and myocardial infarction mortality[J]. *Circulation*, 2023, 148(4): 312–323.
- [10] 张明, 过仲阳, 谈建国. 气候变化对人群健康影响评估方法的研究进展 [J]. *环境与职业医学*, 2021, 38(2): 169–174.
- [11] 张经纬, 冯利红, 侯常春, 等. 天津市大气污染对儿童呼吸系统疾病影响的病例交叉研究 [J]. *中华疾病控制杂志*, 2019, 23(5): 545–549.
- [12] 栾桂杰, 殷鹏, 王黎君, 等. 中国多个城市居民死亡与夏季高温的相关性研究 [J]. *中华流行病学杂志*, 2019, 40(1): 59–63.
- [13] He L, Liu C, Shan XB, et al. Impact of high temperature on road injury mortality in a changing climate, 1990–2019: a global analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857(Pt 1): 159369.
- [14] 肖瑶. 深圳市温度变化对非意外死亡的短期效应研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [15] 牛彦麟, 杨军, 林华亮, 等. 高温热浪对北京市居民死亡影响附加效应 [J]. *中国公共卫生*, 2022, 38(3): 344–350.
- [16] Xia YZ, Shi CL, Li Y, et al. Effects of ambient temperature on mortality among elderly residents of Chengdu city in southwest China, 2016–2020: a distributed-lag non-linear time series analysis [J]. *BMC Public Health*, 2023, 23(1): 149.
- [17] Yin P, Chen RJ, Wang LJ, et al. The added effects of heatwaves on cause-specific mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities[J]. *Environment International*, 2018, 121(Pt 1): 898–905.
- [18] 许丹丹, 班婕, 陈晨, 等. 2013—2015 年上海市高温热浪事件对人群死亡风险的影响 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(11): 991–995.
- [19] 李承程, 李晓妹, 许云皓, 等. 1990 至 2019 年中国及全球归因于高温暴露的疾病负担分析 [J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2023, 41(4): 271–276.
- [20] Ren RR, Xie M, Chen MX, et al. The impact of heat waves on the mortality of Chinese population: a systematic review and meta-analysis[J]. *Medicine*, 2023, 102(13): e33345.