张兴山,付桂琴,刘华悦,等.不同热浪强度对邯郸市呼吸系统疾病门诊就诊人数影响的生态学研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6433-6439.
Zhang X S, Fu G Q, Liu H Y, et al. An ecological study of the effects of varying heatwave intensities on outpatient visits for respiratory diseases in Handan city [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6433-6439.

# 不同热浪强度对邯郸市呼吸系统疾病门诊就诊人数影响的生态学研究

张兴山[1],付桂琴[2,3*],刘华悦[2],李 猛[1**],张 阳[1],赵 亮[4] (1.河北省邯郸市气象局,河北 邯郸 056001；2.河北省气象服务中心,河北 石家庄 050021；3.河北省气象与生态环境重点实验室,河北 石家庄 050021；4.中国科学院大气物理研究所,大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG),北京 100029)

**摘要**：基于 2016~2021 年邯郸市逐日呼吸系统门诊数据、气象监测数据以及空气污染数据,采用广义加性模型(GAM)评估了 12 种热浪(采用 P96~P99 百分位阈值,持续 2~4d)对呼吸系统疾病的就诊风险.结果显示,热浪事件的发生频率和持续时间呈显著定义依赖性,气温在 P99 百分位阈值且持续 4d 的极端热浪 6a 仅出现 2 次(9d),而 P96 百分位阈值且持续 2d 的达到 20 次(66d);热浪期温度高于非热浪期,且温度变异性降低,日均门诊量存在明显差异;热浪影响期间,持续时间 2~3d 以上的热浪,风险随强度增加先升后降,持续时间 4d 以上的热浪,风险随强度增加逐渐降低;P96~P98 热浪显著风险峰出现在 lag3-5,P99 热浪的风险高峰出现在 lag1;长持续热浪(d4)的风险明显高于短期热浪(d2),且影响更为持久;热浪均呈现"双峰滞后模式",急性期(lag0-3)和延迟期(lag5-7),低强度且短持续时间热浪的风险曲线较为平缓,而高强度且长持续时间热浪的风险曲线波动幅度较大.本研究为建立动态热浪健康预警系统提供了区域适应性证据.

**关键词**：热浪；呼吸系统疾病；广义相加模型；滞后效应
**中图分类号**：X503 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6433-07

**An ecological study of the effects of varying heatwave intensities on outpatient visits for respiratory diseases in Handan city.**

ZHANG Xing-shan[1], FU Gui-qin[2,3*], LIU Hua-yue[2], LI Meng[1**], ZHANG Yang[1], ZHAO Liang[4] (1.Handan Meteorological Bureau, Handan 056001, China；2. Hebei Meteorological Service Center, Shijiazhuang 050021, China；3.Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China；4.State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmosphere Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6433~6439

**Abstract**：In the context of global climate change, the health impacts of heatwave events exhibit marked regional heterogeneity, posing a severe threat to public health. This study analyzed daily respiratory disease outpatient data, meteorological monitoring data, and air pollution data from Handan City (2016~2021) using a Generalized Additive Model (GAM) to evaluate the risk of respiratory disease visits under 12 heatwave definitions (based on P96-P99 percentile thresholds lasting 2~4 days). Results demonstrate significant definition-dependent variability in heatwave frequency and duration: extreme heatwaves (P99 threshold, ⩾4days) occurred only twice (9 cumulative days) over six years, while moderate heatwaves (P96 threshold, ⩾2days) reached 20 occurrences (66 cumulative days). During heatwave periods, temperatures were significantly higher with reduced variability compared to non-heatwave periods, accompanied by statistically significant differences in daily outpatient volumes.Forheatwaves lasting 2~3 days, health risks initially increased and then decreased with rising intensity, whereas for events lasting ⩾4 days, risks progressively declined with increasing intensity. Peak risks for P96-P98-defined heatwaves occurred at lag 3~5 days, while P99-defined extreme heatwaves showed immediate peak risks at lag1day. Long-duration heatwaves (⩾4days) posed significantly higher and more prolonged risks compared to short-duration events (⩾2days). All heatwave types exhibited a "bimodal lag pattern" with acute (lag 0~3) and delayed (lag 5~7) effect phases. The risk profile for low-intensity, short-duration heatwaves was relatively stable, whereas high-intensity, long-duration events demonstrated greater risk fluctuations. These findings provide regionally tailored evidence to inform the development of dynamic heatwave health early warning systems.

**Key words**：heatwave；respiratory diseases；generalized additive model；lag effect

**收稿日期**：2025-04-17
**基金项目**：中国气象局公服中心开放基金资助项目(M2022008);河北省气象局青年基金资助项目(23ky09)

* 责任作者，研究员级高级工程师, fgq84@tom.com; ** 工程师, huangjiabeyond@126.com

气候变化已成为 21 世纪全球公共卫生领域面临的重大挑战,其中极端高温事件对人群健康的影响日益凸显[1-2].政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,全球变暖趋势持续加剧,导致极端高温事件频率、强度和持续时间显著增加,对人类健康构成严峻威胁[3-4].全球疾病负担研究(GBD)数据显示,1990~2019 年间热浪相关超额死亡率上升了 74%[5],而呼吸系统疾病作为典型的气候敏感性疾病,其疾病负担与高温暴露呈现显著相关性[6].在中国,呼吸系统疾病死亡率长期居高不下,2019 年部分地区城市和农村居民死亡率分别达 65.02/10 万和 74.61/10 万[7],凸显研究热浪健康效应的紧迫性.

现有流行病学证据表明,气温与呼吸系统疾病风险呈非线性"J"型暴露-反应关系,极端高温可使呼吸系统疾病风险增加[8].近年来,已有研究揭示了热浪健康影响的时空异质性与复杂性,高温响应的纬度差异凸显了动态设定阈值的必要性[9];热浪对呼吸系统疾病(如哮喘)的影响呈现明显的滞后效应,风险通常在暴露后 2~3 天达到峰值[10];分布滞后非线性模型(DLNM）分析揭示,气象要素对疾病的影响存在复杂的非线性与滞后特征[11];同一地区不同时期的研究进一步表明,呼吸系统疾病人群对热浪的脆弱性呈上升趋势[12];复合型热浪事件因其显著的叠加效应,导致的心肺疾病死亡负担远高于单一高温事件[13].此外,热浪可通过多重病理机制影响呼吸系统,包括气道高反应性增强、炎症因子释放及免疫功能抑制等[14-16],且老年人和基础疾病患者风险更高[17].研究表明,低温对呼吸系统疾病的影响以滞后效应为主,而污染物多以即时效应为主[18].

尽管已有研究在热浪与呼吸系统疾病关系领域取得了显著进展,但当前研究仍存在一定的局限性.多数研究在确定热浪阈值时,仍采用固定温度阈值[19-22](如世界卫生组织(WHO)的 32℃或中国气象局的 35℃),忽视区域热适应差异,可能低估实际风险[23],同时,对强度-持续时间交互作用的研究较少[13],现有预警系统未充分整合滞后效应和人群脆弱性特征[24]等问题,限制了公共卫生干预的精准性.成都市西南郊区冬季大气颗粒物中典型新污染物的污染特征研究提示需关注复合污染物的健康影响[25].因此,本研究以邯郸地区为研究对象,采用动态百分位阈值(P96~P99)来反映该地区人群的热适应性,通过建立强度-持续时间的 12 种组合,系统解析二者的交互作用对呼吸系统疾病就诊的风险.研究成果将为精准化热浪预警提供科学依据,对制定区域适应性公共卫生策略具有重要价值.

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

使用 2016~2021 年邯郸逐日气象观测数据和呼吸系统疾病门诊就诊数据.气象观测数据来源于河北省信息共享平台,包括日平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度等,所有数据均经过信息中心严格的质量控制,同期 $PM_{2.5}$ 浓度资料为邯郸市 6 个污染物监测站点日均浓度平均值;疾病数据来源于邯郸市中心医院、第一医院两家三甲综合医院的同期呼吸系统门诊数据(ICD-10 编码:J00-J47),共 336585 例就诊记录,无数据缺失的情况.医院服务范围覆盖了邯郸市,具有较高的代表性,能够为研究热浪与呼吸系统疾病的关系提供可靠的数据支持.

### 1.2 热浪定义与非热浪日选取

采用百分位数法定义热浪事件,以 2016~2021 年为基准期计算日平均气温的百分位数.共建立 12 个分类等级,结合 4 个百分位阈值(P96~P99)和 3 个持续时间要求(2~4d),详见表 1.例如,编号为 P99d4 类别表示日平均气温超过第 99 百分位数(32.0℃)且至少持续 4d 的极端高温事件.此既能真实反映热浪对疾病的影响,又能捕捉持续时间和强度水平增加对疾病的影响.

**表 1 邯郸市(2016~2021 年)热浪的定义标准**

Table 1 Heatwave definition criteria in Handan city (2016~2021)

| 定义编号 | 百分位阈值 | 气温阈值(℃) | 持续时间(d) |
|---|---|---|---|
| P99d4 | | | ≥4 |
| P99d3 | ≥99th | 32.0 | ≥3 |
| P99d2 | | | ≥2 |
| P98d4 | | | ≥4 |
| P98d3 | ≥98th | 31.5 | ≥3 |
| P98d2 | | | ≥2 |
| P97d4 | | | ≥4 |
| P97d3 | ≥97th | 31.1 | ≥3 |
| P97d2 | | | ≥2 |
| P96d4 | | | ≥4 |
| P96d3 | ≥96th | 30.7 | ≥3 |
| P96d2 | | | ≥2 |

注:定义编号前三位为百分位阈值,后两位表示持续时间.如P99d4为日平均气温≥第99百分位值(32.0°C)且持续时间≥4d.

非热浪日的选取方法如下:针对每个持续 *N*d 的热浪过程,选取其前 2*N*d 作为候选非热浪日,同时,如若候选日内包含其它热浪日至热浪结束后 3d 的时间段,需要进行剔除.例如,对于 2016 年 7 月 6~8 日持续 3d 的热浪过程,将其前 6d(即 6 月 30 日~7 月 5 日)作为候选非热浪日,由于 2016 年 6 月 28~30 日也属于热浪期,因此需剔除 7 月 1~3 日这 3d,最终确定 7 月 4 日和 5 日为该热浪过程对应的非热浪日.根据以上数据处理方式,计算呼吸系统疾病就诊的相对危险度(RR)及其 95% CI.

温度差异分析采用 Mann−Whitney U 检验($N$<30)和 Welch t 检验($N$≥30)比较热浪期与非热浪期温度差异.

### 1.3　健康风险评估

使用匹配的数据拟合具有泊松分布的广义相加模型(GAM),如下所示:

$$\log E[Y_i]=\alpha+\beta ETE+NS(RH,df)+NS(PM_{2.5},df)+\omega Temp_i+Year_i+DOW_i+Holiday_i \quad (1)$$

式中:ETE 为热浪事件,以二分类变量纳入模型(0 为非热浪日,1 为热浪日);以非热浪作为参照组,计算热浪日的风险;NS()为自然立方样条函数;$Temp_i$ 为第 $i$ 日最高气温;$Year_i$ 是第 $i$ 日的年份变量,用以控制长期变化趋势;$DOW_i$ 为星期哑变量,用以控制星期效应;$Holiday_i$ 为节假日效应哑变量,以控制节假日效应;自由度选择依据 AIC 准则并结合相关研究共同确定.根据模型回归系数$\beta$,计算热浪日相较于非热浪的门诊人数增加的风险 RR($RR=\exp(\beta)$).为了分析热浪对就诊人数增加的滞后影响,分别使用每个滞后日 (滞后 1、2、…7)的匹配数据拟合方程(1).

## 2　结果与讨论

### 2.1　2016~2021 年热浪期与非热浪期数据特征分析

**2.1.1　热浪频率和持续时间特征**　2016~2021 年邯郸市热浪事件的特征见(表 2).热浪事件的发生频率和持续时间存在显著差异,当采用标准 P99d4 时,6a 间仅记录到 2 次热浪事件,总持续天数为 9d,而采用标准 P96d2 时,热浪事件次数增至 20 次,总天数达到 66d.

**表 2　邯郸市(2016~2021 年)热浪期与非热浪期的数据统计对比**

Table 2　Comparative statistics between heatwave and non−heatwave periods in Handan city (2016~2021)

| 定义编号 | 组别 | 事件数($n$) | 总天数 (d) | 平均气温(°C) 平均值±标准差 | P75 | P25 | $P$ 值 | 日均门诊量 平均值±标准差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P99d4 | HW | 2 | 9 | 32.5 ±0.6 | 33.0 | 32.1 | <0.001*** | 181.3±50.9 |
| | Non−HW | – | 15 | 29.4 ±1.3 | 30.5 | 28.3 | (MWU) | 158.6±46.5 |
| P99d3 | HW | 3 | 12 | 32.4 ±0.5 | 32.8 | 32.1 | <0.001*** | 171.9±46.9 |
| | Non−HW | – | 20 | 29.1 ±1.6 | 30.4 | 28.0 | (MWU) | 154.3±45.2 |
| P99d2 | HW | 4 | 14 | 32.5 ±0.5 | 33.0 | 32.1 | <0.001*** | 163.1±50.3 |
| | Non−HW | – | 23 | 29.1 ±1.5 | 30.3 | 28.2 | (MWU) | 151.2±42.9 |
| P98d4/d3 | HW | 3 | 16 | 32.2 ±0.6 | 32.4 | 31.8 | <0.001*** | 161.8±46.1 |
| | Non−HW | – | 28 | 28.1 ±2.2 | 30.2 | 26.0 | (MWU) | 166.2±50.0 |
| P98d2 | HW | 9 | 28 | 32.2 ±0.6 | 32.4 | 31.5 | <0.001*** | 153.9±42.9 |
| | Non−HW | – | 39 | 28.1 ±2.2 | 30.3 | 26.7 | (Welch) | 154.2±50.6 |
| P97d4 | HW | 4 | 22 | 32.0 ±0.6 | 32.3 | 31.4 | <0.001*** | 155.0±43.2 |
| | Non−HW | – | 33 | 28.5 ±2.1 | 29.5 | 25.8 | (Welch) | 153.7±50.6 |
| P97d3 | HW | 7 | 31 | 31.9 ±0.7 | 32.2 | 31.2 | <0.001*** | 149.0±41.3 |
| | Non−HW | – | 48 | 27.3 ±2.6 | 29.7 | 25.9 | (Welch) | 144.4±49.8 |
| P97d2 | HW | 15 | 47 | 31.7 ±0.7 | 32.2 | 31.1 | <0.001*** | 156.0±44.9 |
| | Non−HW | – | 64 | 27.4 ±2.5 | 29.6 | 26.2 | (Welch) | 141.8±43.6 |
| P96d4 | HW | 4 | 28 | 31.7 ±0.7 | 32.3 | 31.1 | <0.001*** | 158.0±44.0 |
| | Non−HW | – | 33 | 27.6 ±2.3 | 29.0 | 25.7 | (Welch) | 156.0±44.6 |
| P96d3 | HW | 10 | 46 | 31.7 ±0.9 | 32.1 | 30.8 | <0.001*** | 153.6±40.2 |
| | Non−HW | – | 42 | 26.7 ±2.3 | 29.1 | 25.8 | (Welch) | 143.5±47.7 |
| P96d2 | HW | 20 | 66 | 31.4 ±0.8 | 32.0 | 30.8 | <0.001*** | 155.6±43.3 |
| | Non−HW | – | 57 | 26.9 ±2.2 | 29.1 | 26.0 | (Welch) | 140.0±40.0 |

注: 1).HW指热浪日;Non−HW指非热浪日2).统计检验方法:MWU指曼−惠特尼U检验(样本量$n$<30),Welch's $t$−test 指韦尔奇$t$检验(样本量$n$≥30)3).显著性水平:**$P$<0.01,***$P$<0.001 (双尾检验).

2.1.2 不同强度热浪与非热浪期温度和日均门诊量差异分析 以 P99d4 为例,热浪期平均气温达(32.5±0.6)℃,较非热浪期(29.4±1.3)℃高出 3.1℃,随着百分位阈值从 99%降至 96%,温差呈现扩大趋势,P96d2 的温差达到 4.5℃.热浪期的温度标准差(0.5~0.9)℃明显小于非热浪期(1.3~2.6)℃,降幅达 53~72%.此外,热浪期的温度四分位距(IQR)普遍缩小 60%以上,进一步证实了热浪期间温度分布更为集中的特点.Mann-Whitney U 检验和 Welch t 检验结果显示热浪和非热浪温度差异显著($P$<0.001).

热浪期与非热浪期的日均门诊量存在明显差异,在标准 P99d4 下,热浪期日均门诊量达(181.3± 50.9)人次,高于非热浪期的(158.6±46.5)人次.但随着热浪定义强度的下降,门诊量差异呈现复杂变化, P98d4/d3 标准下非热浪期门诊量反而略高,而 P97d2 标准下热浪期门诊量(156.0±44.9)又高于非热浪期(141.8±43.6).

邯郸市热浪特征呈现显著的定义依赖性,这一现象与华北平原独特的气候背景密切相关.P96d2 标准下的高频热浪事件(20 次/6a)与西太平洋副热带高压季节性北跳的常态过程相符,而 P99d4 事件的罕见性(2 次/6a)则反映了大陆高压异常叠加的特殊环流形势[26-27].值得注意的是,热浪期温度变异性降低的特征(标准差降幅 53%~72%)从气象学角度佐证了稳定高压系统对边界层热力结构的调控作用[28].温差幅度与门诊量的非线性关联提示,单纯依赖绝对温度阈值可能无法准确预测健康风险,需结合相对温升指标完善预警体系.

2.2 热浪对呼吸系统疾病门诊就诊人数的影响

2.2.1 不同强度热浪的暴露-反应效应 图 1 为不同强度和持续时间的热浪对呼吸系统疾病门诊就诊人数影响的相对危险度及 95%置信区间.在热浪期(即时效应,即 lag0),持续时间在 2d 和 3d 以上时,P96~P97 强度范围内风险随强度增加而上升,P97 强度之后随强度增加而回落;而持续时间在 4d 以上的热浪,风险随强度增加逐渐降低,且 P96(RR=1.26, 95%CI:1.08~1.47)和 P97(RR=1.23,95%CI:1.05~1.45)热浪风险均显著.

在热浪滞后期(滞后效应,即 lag1-7),P96 和 P97 强度热浪的显著风险高峰多出现在 lag3(如 P96d2 在 lag3 的 RR=1.15,95%CI:1.03~1.28);P98 热浪表现出独特的“延迟凸显”模式,其即时风险不显著(如 P98d4,RR=1.10,95%CI:0.92~1.31),而显著风险峰出现在 lag3(如 P98d2,RR=1.15,95%CI:1.01~1.32)和 lag5(如 P98d3/d4,RR=1.30,95%CI:1.05~1.60);P99 热浪的风险高峰出现在 lag1,风险未达统计学显著性(如 P99d4,RR=1.34,95%CI:0.78~2.30),但呈现双向波动特征,lag4 时 RR 显著降低至 0.68(95%CI:0.42~1.12),lag7 时回升至基线水平(RR=0.98,95%CI:0.55~1.74).

2.2.2 不同强度热浪的持续时间效应 热浪持续时间与风险强度呈正相关.在相同强度等级下,持续时间更长的热浪(d4)比短期热浪(d2)导致更高的健康风险.以 P97 为例,d4 热浪风险可持续至热浪结束后 lag7(RR=1.36,95%CI:1.05~1.76),而 d2 热浪在同期的 RR 仅为 1.07(95%CI:0.96~1.21),这种持续效应在 P96 和 P98 热浪中同样显著,而 P99 热浪的持续时间效应相对较弱.同时发现,长持续时间的热浪(d4)的健康影响更为持久,除 P99 以外的 d4 热浪的风险均可持续至 lag7,而 d2 热浪的影响多在 lag3 后逐渐消失,例如,P96d4 在 lag7 的 RR 仍达 1.40($P$=0.006),而 P96d2 在同期的 RR 已降至 1.07($P$=0.245).

热浪强度-持续时间-门诊就诊风险的非线性关系具有重要的公共卫生意义.当热浪强度达到 P98 百分位阈值时出现的门诊量反向关联现象,可能反映了两方面机制:一是极端高温下空调使用率提升带来的保护效应;二是人群行为模式改变(如减少户外活动)产生的混杂影响[29],提示社会经济因素可能在热浪-疾病就诊关系中起调节作用.特别值得关注的是长持续热浪(d4)的健康风险特征.即使中等强度(P96)的 4d 持续热浪,其风险也显著高于短期极端高温(P99d2),这与 Cheng 等[30]的研究结论有一定的一致性.从生理学角度看,持续高温暴露可能导致热调节系统代偿功能衰竭,进而引发全身性炎症反应[31].这一发现强烈建议公共卫生预警系统需要建立多维度的热浪评价指标.

2.2.3 不同强度热浪的滞后模式 不同类型的热浪基本呈现“双峰滞后模式”,第一个风险峰出现在 lag0-3(急性效应期),第二个风险峰出现在 lag5-7(延迟效应期).急性效应期,所有热浪均表现出显著风险,其中 P96d4 在 lag3 的 RR 高达 1.35(95%CI:1.08~1.69),而 P99d4 在 lag1 的 RR 达 1.34(95%CI:0.78~2.30).延迟效应期,P96d4 和 P97d4 热浪表现出风险

持续,如 P97d4 在 lag7 的 RR 仍达 1.36(95%CI:1.05~1.76).研究还发现,不同强度热浪的滞后曲线形态存在差异,低强度且短持续时间热浪(如 P96d2)的风险曲线较为平缓,风险达到高峰后随时间缓慢下降,而高强度且长持续时间热浪(如 P99d4)的风险曲线更为陡峭,波动幅度较大.

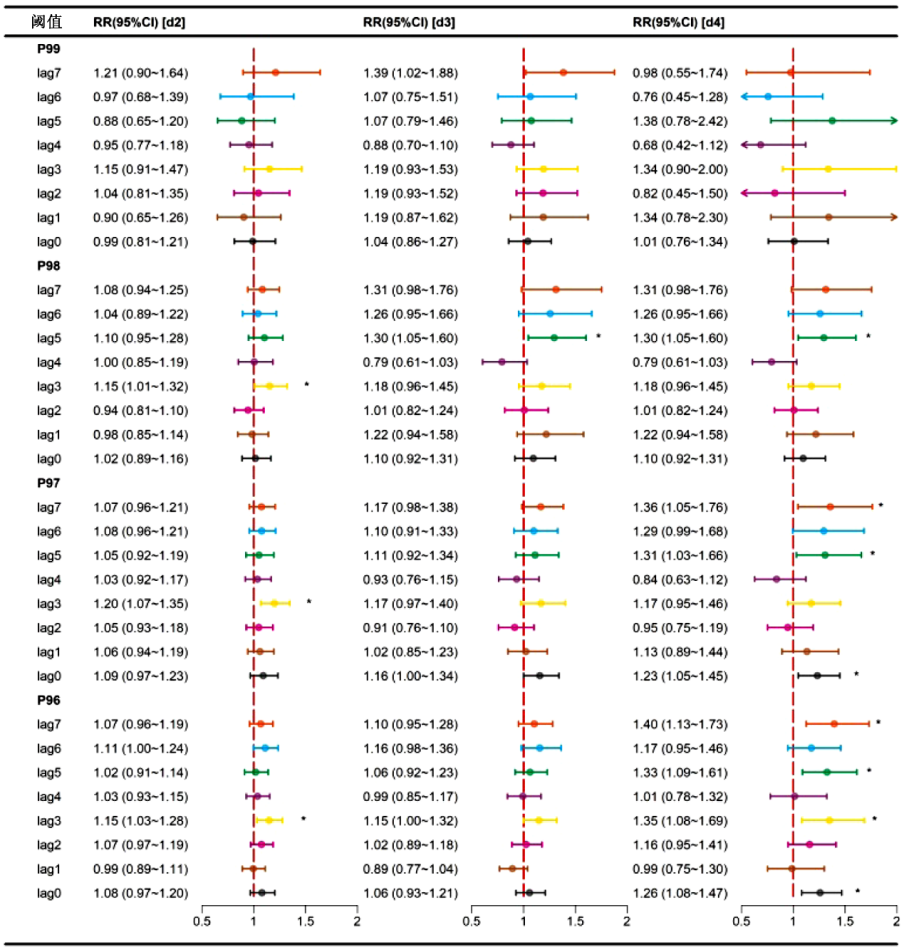



图 1　不同强度和持续时间的热浪对呼吸系统疾病门诊就诊人数影响的相对风险

Fig.1　Relative risk of the impact of heatwaves with different intensities and durations on the number of outpatient visits for respiratory diseases

研究观察到“双峰滞后模式”.急性效应期的风险峰值可能源于高温直接损伤呼吸道上皮紧密连接,增加病原体易感性[32],热应激诱导的氧化应激反应导致局部炎症因子释放等;而延迟效应期的风险再现,则可能与 Th1/Th2 免疫平衡破坏后的继发感染有关,这一假设得到动物实验证据支持[33].不同强度热浪的滞后曲线形态差异尤其值得关注.P98 热浪在 lag5 出现的显著风险峰值(RR=1.30)提示存在“二次打击”现象,可能与热损伤修复期遭遇其他暴露因素协同作用相关联[34].这一发现为临床预防提供了关键时间窗口,建议在热浪结束后第 5d 加强高危人群的监测.

### 2.3　研究局限性与未来方向

本研究基于门诊就诊数据这一综合性数据展开分析,尽管在一定程度上揭示了热浪事件与总体门诊量之间的关联,但在深入探究热浪对特定呼吸系统疾病的影响机制方面存在一定局限难以确切知晓热浪究竟是如何具体影响 COPD 和哮喘等不同呼吸系统疾病的发病风险,也未能考虑到人群易感性差异,无法分析不同年龄段、不同健康状况人群在热浪期间呼吸系统疾病的发病特点和规律.后续需要精细数据的收集,从而开展更深入、更细致的研究来弥补这些不足.

## 3　结论

### 3.1　邯郸市热浪事件特征呈现显著的定义依赖

性,P96d2 标准下热浪频次达 20 次/6a,而 P99d4 标准仅记录 2 次.热浪期温度变异性显著降低(标准差降幅 53~72%),证实高压系统控制下的温度稳定性增强.热浪期与非热浪期的日均门诊量存在明显差异.

3.2 热浪对呼吸系统疾病门诊的就诊风险存在强度-持续时间交互效应.在热浪期,持续时间在 2~3d 以上的热浪,在 P96~P97 强度范围内风险随强度增加而上升,之后随强度增加而回落;而持续时间在 4d 以上的热浪,风险随强度增加逐渐降低.P96~P98 热浪显著风险峰出现在 lag3-5,P99 热浪的风险高峰更早出现在 lag1;热浪持续时间与风险强度呈正相关,4d 以上热浪的健康影响显著延长至 lag7,提示累积性生理损伤机制.

3.3 不同强度的热浪基本均呈现“双峰滞后模式”.低强度且短持续时间热浪滞后风险曲线较为平缓,而高强度且长持续时间波动幅度较大.

**参考文献:**


[1] Smith K R, Woodward A, Campbell-Lendrum D, et al. Human health: Impacts, adaptation, and co-benefits [C]//Field C B, Barros V R, Dokken D J, et al, eds. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Cambridge: Cambridge University Press, 2014:709-754.

[2] 叶 青,王秋红,吴安华.气候变化带来的健康风险与感染防控面临的挑战 [J]. 中国感染控制杂志, 2025,24(2):149-157.
Ye Q, Wang Q H, Wu A H. Health risks and challenges to infection prevention and control posed by climate change [J]. Chin. J. Infect. Control., 2025,24(2):149-157.

[3] Mukherji A. Climate change 2023 synthesis report [R]. 2023.

[4] Pörtner H O, Roberts D C, Tignor M. IPCC. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R].

[5] Zhao Q, Li S, Ye T, et al. Global, regional, and national burden of heatwave-related mortality from 1990 to 2019: A three-stage modelling study [J]. *PLoS* Medicine, 2024,21(5):e1004364.

[6] Chen R, Yin P, Wang L, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities [J]. Bmj., 2018,363:k4306.

[7] 国家卫生健康委员会.中国卫生健康统计年鉴 2020 [M]. 北京:中国协和医科大学出版社, 2020.
National Health Commission of the People's Republic of China. China health statistics yearbook 2020 [M]. Beijing: Peking Union Medical College Press, 2020.

[8] Anderson G B, Bell M L. Weather-related mortality: How heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States [J]. Epidemiology, 2009,20(2):205-213.

[9] Ma Y, Zhang Y, Jiao H, et al. Extreme temperatures and respiratory mortality in the capital cities at high latitudes in Northeast China [J]. Urban Climate, 2022,44:101206.

[10] Deng S, Han A, Jin S, et al. Effect of extreme temperatures on asthma hospital visits: modification by event characteristics and healthy behaviors [J]. Environmental Research, 2023,226:115679.

[11] 乐 满,王式功,谢佳君,等.环境条件对遵义市呼吸系统疾病的影响及预测研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(11):4334-4347
Yue M, Wang S G, Xie J J, et al. Study about the impact of environmental conditions on respiratory diseases and prediction in Zunyi City [J]. China Environmental Science, 2018,38(11):4334-4347.

[12] Bi X, Wu C, Wang Y, et al. Changes in the associations between heatwaves and human mortality during two extreme hot summers in Shanghai, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2023,95:104581.

[13] Liu J, Qi J, Yin P, et al. Rising cause-specific mortality risk and burden of compound heatwaves amid climate change [J]. Nature Climate Change, 2024,14(11):1201-1209.

[14] 田 颖,张书余,罗 斌,等.热浪对人体健康影响的研究进展 [J]. 气象科技进展, 2013,(2):49-54.
Tian Y, Zhang S Y, Luo B, et al. Research progress in impact of heat wave on human health [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 3(2):49-54.

[15] He Q, Liu Y, Yin P, et al. Differentiating the impacts of ambient temperature on pneumonia mortality of various infectious causes: a nationwide, individual-level, case-crossover study [J]. Ebio Medicine, 2023,98.

[16] Cheng Y, Yu Z, Xu C, et al. Climatic and economic background determine the disparities in urbanites' expressed happiness during the summer heat [J]. Environmental Science & Technology, 2023,57(30):10951-10961.

[17] Zou B, Fan C, Wang M, et al. How do urban-rural and regional summer heat exposures evolve? A case study of 301 cities in China from 2000 to 2020 [J]. Building and Environment, 2025,271:112584.

[18] 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.
MA P, LI R L, LE M, et al. Impacts of meteorological factors and environmental pollutants on digestive diseases in Beijing [J]. China Environmental Science, 2016,36(5):1589-1600.

[19] 孟祥燕.夏季高温对主要心脑血管疾病患病人数及相关理化指标影响研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2020.
Meng X Y. The effect of high temperature in summer onthe number of patients with majorcardiovascular and cerebrovascular diseaseand related physicochemical indexes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.

[20] 付桂琴,陆 倩,张亚男.石家庄高温、热浪和闷热天气对心脑血管疾病死亡人数的影响 [J]. 气象学报, 2022,80(3):403-409.
Fu G Q, Lu Q, Zhang Y N. Analysis of the influence of high temperature, heatwave and sweltering weather on the death number of cardiovascular and cerebrovascular diseases in Shijiazhuang [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022,80(3):403-409.

[21] 薛 莉,胡文琦,魏 然,等.2011~2013 年高温热浪对苍南县高血压门诊就诊量的影响 [J]. 山东大学学报(医学版), 2018,56(8):63-69.
XUE L, HU W Q, WEI R, et al. Impacts of heatwaves on the number

of hypertensive outpatient visits in Cangnan County during 2011 and 2013 [J]. Journal of Shandong University (Health Sciences), 2018,56 (8):63-69.

[22] 匡文韬,赵　锦,倪　涵,等.长沙市 2015~2019 年极端天气事件对循环系统疾病死亡影响 [J]. 中国公共卫生, 2023,39(7):896-901.
Kuang W T, Zhao J, Ni H, et al. Impact of extreme weather events on circulatory system disease mortality in Changsha city: 2015~2019 [J]. Chinese Journal of Public Health, 2023,39(7):896-901.

[23] 林巧绚.基于死亡风险评估的中国不同区域热浪定义及其死亡负担研究 [D]. 广州:暨南大学, 2017.
Lin Q X. Heat-wave definitions based on mortality risk and the mortality burden from heat-wave in different regions of China [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.

[24] 孙庆华,班　婕,陈　晨,等.高温热浪健康风险预警系统研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2015,32(11):1026-1030.
Sun Q H, Ban J, Chen C, et al. Heat waves health risk early warning system:a review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2015,32(11):1026-1030.

[25] 张　芸,唐　冲,颜廷昱,等.成都市西南郊区冬季大气颗粒物中典型新污染物的污染特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):2983-2991.
Zhang Y, Tang C, Yan T Y, et al. Pollution characterization of typical emerging contaminations in atmospheric particulate matter in winter at southwest suburbs of Chengdu City [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):2983-2991.

[26] Liang P, Zhang Z, Ding Y, et al. The 2022 extreme heatwave in Shanghai, lower reaches of the Yangtze River Valley: Combined influences of multiscalevariabilities [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2024,41(4):593-607.

[27] 刘嘉慧敏,郑　然,娄盼星,等.2017 年 7 月陕西高温热浪天气成因及前期信号初探 [J]. 干旱气象, 2019,37(2):233-242.
Liu J H M, Zheng R, Lou P X, et al. Causes of heat wave weather in Shaanxi in July 2017 and preceding signals [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019,37(2):233-242.

[28] Duan J, Zhang H, Jian D, et al. Influences of anthropogenic forcing on the exceptionally warm August 2022 over the Eastern Tibetan Plateau [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2024,105(7): E1068-E1073.

[29] Sun Z, Chen C, Yan M, et al. Heat wave characteristics, mortality and effect modification by temperature zones: a time-series study in 130 counties of China [J]. International journal of epidemiology, 2020, 49(6):1813-1822.

[30] Cheng J, Xu Z, Bambrick H, et al. Cardiorespiratory effects of heatwaves: A systematic review and meta-analysis of global epidemiological evidence [J]. Environmental Research, 2019,177: 108610.

[31] 徐　牛,姜应波,耿仕涛,等.炎症反应在热射病中的作用及产生机制 [J]. 中国热带医学, 2022,(6) 580-584.
Xu N, Jiang Y B, Geng S T, et al. Role and mechanism of inflammatory response in heatstroke [J]. China Tropical Medicine, 2022,22(6):580-584.

[32] Sözener Z Ç, Treffeisen E R, Öztürk B Ö, et al. Global warming and implications for epithelial barrier disruption and respiratory and dermatologic allergic diseases [J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2023,152(5):1033-1046.

[33] 刘宇宸,王向明,万平民,等.热应激引起动物炎症反应的研究进展 [J]. 中国兽医杂志, 2019,55(3):57-60.
Liu Y C, Wang X M, Wan P M, et al. Research progress on heat stress-induced inflammatory responses in animals [J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 55(3),57-60.

[34] 王　琴,刘保献,张大伟,等.北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3636-3646.
Wang Q, Liu B X, Zhang D W, et al. Temporal and spatial distribution of VOCs and their role in chemical reactivity in Beijing. China Environmental Science, 2017,37(10):3636-3646.

**作者简介：**张兴山(1988-),男,甘肃白银人,高级工程师,本科,主要从事健康气象、生态与农业气象等方面研究.发表论文 8 篇.604631940@qq.com.