

张敏,蔡子颖,姚青,等,2024.基于人体热量平衡模型的天津地区中暑气象风险预报技术研究[J].气象,50(7):877-886. Zhang M, Cai Z Y, Yao Q, et al, 2024. Research on heatstroke meteorological risk forecasting technology based on human heat balance model in Tianjin Region[J]. Meteor Mon, 50(7):877-886(in Chinese).

基于人体热量平衡模型的天津地区中暑气象 风险预报技术研究*

张 敏^{1,2,3} 蔡子颖^{1,2,3} 姚 青³ 韩素芹³ 王晓佳³ 杨 旭^{1,2,4}

1 天津市健康气象交叉创新中心,天津 300074

2 天津市气象科学研究所,天津 300074

3 天津市环境气象中心,天津 300074

4 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室,天津 300074

提 要: 基于 2016—2020 年天津市中暑门诊和住院就诊数据,利用广义相加模型和分布滞后非线性模型对气象要素与中暑就诊率的关系进行了分析,引入人体热量平衡模型和热舒适评价指标(PMV),建立了本地化中暑气象风险预警指标。结果表明:天津地区中暑门诊人数和住院人数集中在每年 6 月下旬到 8 月上旬,5 年中 84% 的中暑高发事件集中在 6 次连续过程中,其发生与当日和前一日气象条件相关性最高,当最高气温大于 35℃ 时,中暑人数明显增多。男性比女性更易中暑,老人就诊率显著高于一般人群。中暑就诊率与平均气温、最高气温、相对湿度、太阳辐射强度呈正相关,与平均气温相关性最强,与风速呈负相关。引入人体热量平衡模型,显示 PMV 与中暑就诊率的相关性高于任何单一气象要素,PMV 在评价中暑气象风险方面具备明显优势。并且,以 PMV 为关键指标形成预报方程。

关键词: 高温,中暑气象风险预报预警,人体热量平衡模型,热舒适评价指标(PMV)

中图分类号: P49, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.051701

Research on Heatstroke Meteorological Risk Forecasting Technology Based on Human Heat Balance Model in Tianjin Region

ZHANG Min^{1,2,3} CAI Ziyang^{1,2,3} YAO Qing³ HAN Suqin³ WANG Xiaojia³ YANG Xu^{1,2,4}

1 Tianjin Health Meteorology Cross-Innovation Center, Tianjin 300074

2 Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074

3 Tianjin Environmental Meteorology Center, Tianjin 300074

4 CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074

Abstract: Based on the outpatient and inpatient data of heatstroke in Tianjin from 2016 to 2020, a comparative analysis of the relationship between meteorological factors and the heatstroke outpatient rate is conducted using the Generalized Additive Model and Distributed Lag Nonlinear Model. By introducing the human heat balance model and predicted mean vote (PMV), a localized heatstroke meteorological risk warning index is established. The results show that the numbers of outpatient and inpatient cases of heatstroke in Tianjin are concentrated from late June to early August each year, with 84% of the peak heatstroke

* 国家自然科学基金面上项目(42177465)、中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室运行维持项目(CXFZ2024P008)和开放基金项目(CMANKU202307)及中国气象局创新发展专项(CXFZ2022P063)共同资助

2023 年 2 月 24 日收稿; 2024 年 5 月 14 日收修定稿

第一作者:张敏,主要从事大气环境与大气健康研究. E-mail:xyjandzm@163.com

通讯作者:蔡子颖,主要从事大气物理与大气环境研究. E-mail:120078030@163.com

days occurring in 6 continuous weather processes over the 5 years. The occurrence of heatstroke is most correlated with the meteorological conditions of that day and the previous day. There is a significant increase in heatstroke cases when the maximum temperature exceeds 35°C. Males are more susceptible to heatstroke than females, and the outpatient rate of the elderly is significantly higher than the general population. The heatstroke outpatient rate is positively correlated to average temperature, maximum temperature, relative humidity, and solar radiation intensity, with the strongest correlation with average temperature but a negative correlation with wind speed. Introducing the human heat balance model, PMV shows a higher correlation with the heatstroke outpatient rate than any single meteorological factor, indicating PMV has a clear advantage in evaluating heatstroke meteorological risk. A forecasting equation with PMV as the key indicator is developed.

Key words: high temperature, heatstroke meteorological risk forecast and warning, human heat balance model, predicted mean vote (PMV)

引 言

中暑是一种高温引起的疾病,当环境温度大于或等于皮肤温度时,人体大量出汗可引起体内失水失盐,若不及时补充会导致体内蓄积余热过多,体温逐渐升高,从而出现呼吸与脉搏加快、头昏眼花、恶心耳鸣等症状。发达国家对高温热浪导致的发病及死亡已进行多年研究,发现高温热浪和居民死亡呈直接关系(Huynen et al, 2001; Brooke and Bell, 2011; Saucy et al, 2021),很多城市如费城、罗马和芝加哥等已建立热浪预警系统(Kalkstein and Greene, 1997; Whitman et al, 1997; Conti et al, 2005)。近年来,我国的上海、武汉、南京和广州等地都开展了中暑与高温气象条件的研究(谈建国和黄家鑫, 2004; 何权等, 1990; 付文娟等, 2020; 谭冠日和黄劲松, 1990; 付桂琴等, 2022; Yan et al, 2023),大多通过选取气温、气压、湿度和日照等气象要素,结合中暑病例的数量进行分析,找出关键气象因子,对高温引起的中暑事件进行预报预警。气候变暖使京津冀地区高温热害天气增多(施洪波, 2011; 陆开来等, 2022),老龄化又使得高温敏感人群进一步增多(Schneider et al, 2017),高温对居民身体健康的风险不仅局限在南方地区(卫捷和孙建华, 2007; 张可慧, 2011; 吴锦成等, 2022),然而目前我国对于中暑的研究大多集中在南方地区,预报标准亦由南方样本所得,其与北方地区有明显差异。天津市作为中国北方人口超过 1000 万的超大城市,对由高温等气象因素造成的中暑分析研究较少,但高温的影响在近年却越发明显,因此迫切需要结合天津当地中暑病例,针对易发人群,建立中暑气象风险预报预警指

标和方法。

1 数据及方法

1.1 数据来源

本文使用数据包括中暑就诊医疗数据、气象数据、人口统计数据三部分。中暑就诊医疗数据来源于天津市健康医疗大数据有限公司,涵盖天津市二级及以上共 114 家医院,其中三级医院 31 家;包括 2016—2020 年中暑门诊和住院就诊人数、患者年龄及性别等信息。气象数据来源于天津市气象局,包括温度、相对湿度、风速、太阳辐射强度等气象要素小时观测数据。人口统计数据来自天津市疾病预防控制中心发布的《天津市居民健康状况报告(2018 年度)》(天津市卫生健康委员会, 2020)和《天津统计年鉴(2019)》(天津市统计局和国家统计局天津调查总队, 2020)。

1.2 人体热量平衡模型和 PMV 指数

本文使用的人体热量平衡模型为 RayMan 模型,由 Matzarakis et al(2007; 2010)根据德国工程师协会标准开发,是人类生物气象学评估的重要工具,输入气象参数主要为逐小时的气温、湿度、风速和太阳辐射强度,输出指标为人体生理等效温度(PET)、标准有效温度(SET)、PMV(predicted mean vote)指数等。PMV 可由式(1)具体求解。该公式由 Fanger(1970)基于人体热舒适方程及 1396 个受试者的热感觉投票结果确定,主要用于评价某环境的热舒适性偏离“热中性”环境舒适性的程度,其偏离程度取决于某环境状态需要调节的人体热负荷大

小,其值为 0 时表示环境的热舒适度最佳,正值越大代表越热,负值越大代表越冷,该指标综合考虑了与

人体热感觉相关的各类环境气象要素,在研究造成中暑的气象因素方面具有一定优势。

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0.303\exp(-0.036M) + 0.0275] \times \{(M - W) - 3.05[5.733 - 6.99(M - W) - \\ & P_a] - 0.42(M - W - 58.15) - 1.73 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - \\ & 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: M 为人体能量代谢率,单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; W 为人体做功率,单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; P_a 为人体周围水蒸气分压力,单位: kPa ; t_a 为人体周围环境温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; f_{cl} 为衣着系数,取值 0~1,代表衣物覆盖身体面积的比例; t_{cl} 为服装外表面平均温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; t_r 为环境平均辐射温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; h_c 为对流换热系数,单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

1.3 GAM 和 DLNM 模型

利用 R3.6.3 软件中自带的广义相加模型(GAM)和分布滞后非线性模型(DLNM)程序包,分析不同的气象要素对中暑就诊率的影响。GAM 模型可处理因变量和众多解释变量间过度复杂的非线性关系(Hastie and Tibshirani, 1986),通过计算相对危险度(RR)来定量评价影响程度。DLNM 模型用构建最高气温的交叉基函数,实现同时描述因变量在自变量维度与滞后维度的分布(Gasparrini et al, 2010),近年来被广泛用于气象污染健康效应定量评价研究(黄照等, 2018; 孙庆华等, 2016; 鹿文涵等, 2022; 杨仁庆等, 2023),模型表达式如下:

$$\begin{aligned} \log[E(Y)] = & \alpha + \beta X + \sum_{i=1}^n ns(Z_{k,i}, df) + \\ & ns(T, df) + \gamma E_w + \lambda E_H \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Y 为中暑就诊人数; $E(Y)$ 为就诊人数的期望值; X 表示由 DLNM 构建的某种气象要素(例如最高气温、PMV 指数等)与滞后时间的交叉基; Z_k 表示温度、气压、湿度、风速、太阳辐射等气象要素; $ns()$ 为样条函数; T 表示时间变量; df 为自由度,通过使模型残差偏自相关最小和图形拟合对比确定; α 代表截距, β 、 γ 、 λ 代表回归系数; E_w 和 E_H 分别代表星期效应和假期效应(李兰玉等, 2022; 杨仁庆等, 2023)。

2 结果分析

2.1 天津市夏季中暑门诊就诊情况

2.1.1 中暑门诊和住院就诊人数随时间变化分析

统计 2016—2020 年天津市中暑门诊和住院人

数,中暑高发期为 6 月下旬到 8 月上旬(图 1),占全年门诊和住院就诊人数的 74% 和 78%,单日门诊和住院就诊人数分别为 22.33 人和 4.13 人,为年均价的 5 倍。中暑就诊人数有明显波动性,即使是中暑高发的夏季,其 10% 高值样本也是该期间平均就诊人数的 2 倍。单日门诊人数主要集中在 11~30 人,占比 60.8%,31~40 人占比 8.2%,41~50 人占比 4.1%,51~60 人占比 4.4%,61 人以上占比 2.6%。非高发期,出现单日门诊 30 人以上的仅为 2 天。住院与门诊人数具有很好相关性,相关系数为 0.69,统计数据表明:30 人以上门诊人数对应 6 人以上住院人数,且随就诊人数(中暑门诊和住院人数之和)增加,住院人数占就诊人数比例增加(图 2),住院人数相比门诊人数爆发有一定滞后性,50% 的过程滞后 0~1 天,50% 的过程滞后 2 天及以上。

中暑就诊人数的高值相比高温天气,具有更强的过程性和连续性。2016—2020 年单日中暑就诊人数超过 36 人的高发日,84% 集中在 6 次连续事件中,分别为 2016 年 7 月 11—13 日,2017 年 7 月 10—21 日,2018 年 7 月 16—23 日,2018 年 7 月 31 日至 8 月 7 日,2019 年 7 月 24 日至 8 月 1 日,2020 年 8 月 3—5 日。6 次连续事件,最长的连续 12 天,最短的连续 3 天,由此也显示出中暑气象风险预警不同于高温预警,累积效应在中暑高发事件中发挥了重要作用。中暑门诊和住院就诊人数时序数据分析,体现出中暑具有过程连续性强、就诊人数波动性大、有一定滞后性等特征,表明中暑气象风险预报预警具有实际意义和可操作性。

2.1.2 分人群中暑就诊率分析

人群差异大是中暑就诊数据体现出的另一特征。将 2016—2020 年天津市不同年龄段、不同性别平均每日中暑门诊就诊人数除以天津市该人群的人口总数,可得到该人群中暑门诊就诊率(图 3);本文以每 100 万人口为基数,分析其中相应人群的日均就诊人数,得到无量纲的门诊日均就诊率。全年龄段人群的中暑门诊日均就诊率为 1.51,其 95% 置信

区间(CI)的上下限分别为1.65 和 1.37,用(95%CI: 1.37,1.65)表示,其中男性为 1.58(95%CI:1.43, 1.74),女性为 1.44(95%CI:1.30,1.58),男性比女性高出 9.72%。分年龄段分析,随年龄增长,男性

和女性就诊率均呈现明显升高趋势。0~10 岁人群就诊率最低,为0.008,71 岁以上人群最高,为 3.68。相对于 31~40 岁中年人,61~70 岁人群的就诊率是其 2.48 倍,71 岁以上人群就诊率是其 3.58 倍。

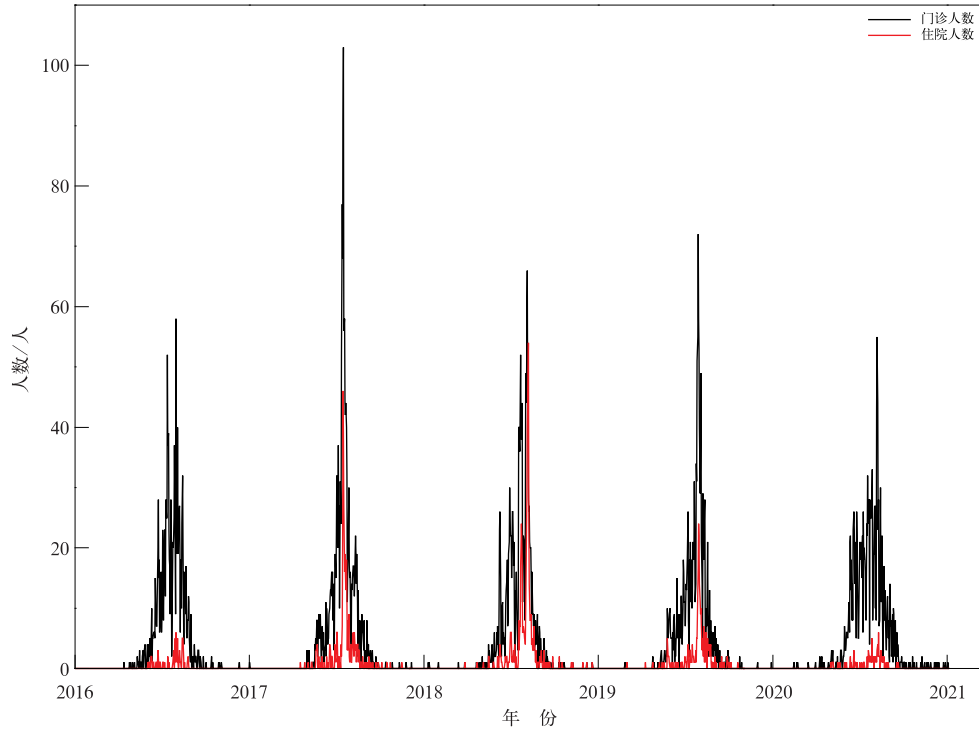


图 1 2016—2020 年天津中暑门诊和住院人数时序图
Fig. 1 Time series of outpatient and inpatient numbers for heatstroke cases in Tianjin from 2016 to 2020

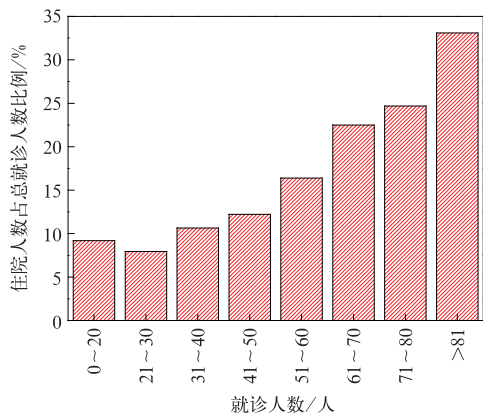


图 2 2016—2020 年天津中暑高发期住院人数占总就诊人数的比例
Fig. 2 Proportion of hospitalized patients to the total number of outpatients during the high-incidence period of heatstroke in Tianjin from 2016 to 2020

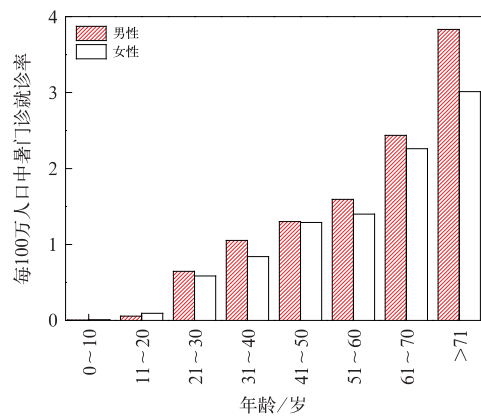


图 3 2016—2020 年天津夏季不同性别不同年龄段中暑门诊就诊率
Fig. 3 Proportion of outpatients of heatstroke in different genders and ages to the total outpatients of Tianjin in summer from 2016 to 2020

即,老年人相比年轻人中暑气象风险明显偏高,在设计中暑气象风险预报预警模型时,可能需补充特殊敏感人群专项指标。

2.2 气象要素与中暑就诊率对比分析

以最高温度、平均气温、相对湿度、平均风速和太阳辐射强度为影响因子,分析气象要素与中暑就诊率(同上节门诊就诊率的计算方法,也是以每 100 万人口为基数,但统计对象为中暑的门诊和住院平均人数之和)关系,考虑到不同年龄人群的中暑风险差异,样本分为全年龄段和 60 岁以上年龄段。其中平均气温相关性最高,全年龄段的相关系数为 0.52,60 岁以上为 0.49;其次为最高气温,全年龄段为 0.49,60 岁以上为 0.46;相对湿度和辐射与中暑就诊率相关系数接近,全年龄段分别为 0.29 和 0.27,60 岁以上分别为 0.26 和 0.24,表明太阳辐射越强、相对湿度越高,中暑概率越高;风速与中暑相关性较弱,这与何玲玲和陈正洪(2009)以及 Nikolopoulou and Lykoudis(2006)的研究结果吻合。

分两方面开展滞后性影响分析,一是以 0 天、1 天(前日)、2 天(前 2 日)、3 天(前 3 日)、4 天(前 4 日)最高气温、平均气温与中暑就诊率数据做相关性分析,相关性最高的为滞后 1 天数据,其次为 0 天,两者较为接近,滞后 2~4 天数据相关性有明显下降。二是通过 GAM 和 DLMN 模型研究,其结果如图 4 所示,高温表现出“即时效应”,即高温条件下,高温对中暑就诊率的影响在滞后 0~1 天内达到最大,当日最高气温为 40℃时,RR 值为 2.63,随着时间的后延,RR 值迅速降低,滞后 8 天时 RR 值只有 1.15,影响基本消失。基于此分析认为,综合建模易操作性和气象对中暑影响滞后效应,选择使用滞后 0~1 天数据建模。由 2.1.1 节分析表明,日均就诊人数 36 人可作为相关高风险辨识指标(5 年 6 次过程,约为全年天数的 2.7%),按照日均就诊率计算为 2.65。由图 5 分析表明,该指标基本对应最高气温大于 35℃,与高温黄色预警一致;当最高气温大于 37℃,平均气温大于 32℃,就诊率将进一步升高,达 3.95;在此基础上如果平均气温大于 33℃,就诊率则高达 8.23。当最高气温大于 31℃,平均气温大于 28℃时,老年人群(>60 岁,下同)就诊率即可达到风险阈值,此时全年龄段人群的中暑风险还很低。当最高气温超过 35℃时,老年人群就诊率增幅也明

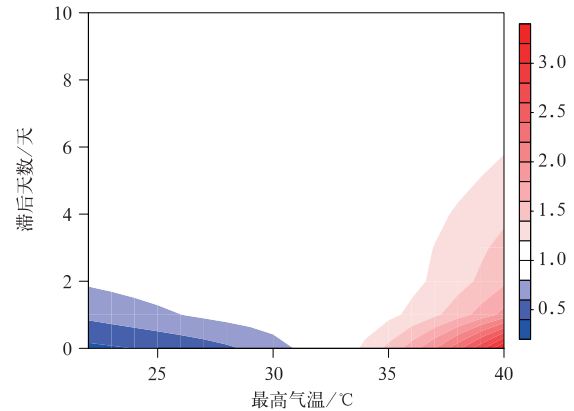


图 4 2016—2020 年天津夏季中暑相对危险度随最高气温和滞后天数变化

Fig. 4 Relative risk of heatstroke changing with maximum temperature and lag days of Tianjin in summer from 2016 to 2020

显大于全年龄段人群情况,由此显示老年人群的中暑阈值更低,更易中暑。

相对湿度和太阳辐射强度虽然与中暑就诊率有很好相关性,但作为叠加因子,更适合分析同等温度条件下其与气温和风速等多因素交互影响。对于平均气温大于 28℃的样本,在相对湿度小于 40%的干燥环境,当日中暑就诊率为高相对湿度环境(60%~80%)的三分之一;相对湿度大于 80%时,中暑就诊率明显高于均值。太阳辐射低于 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,一般对应天气现象为多云或阴,中暑就诊率为强辐射晴空天气日(太阳辐射 $>250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)的 80%左右。中暑就诊率与风速呈负相关,当日均风速低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,由于空气流通性差,更不利于人体散热,其中暑就诊率是风速大于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的 150%。

中暑气象风险与最高温度、平均气温、相对湿度、风速和太阳辐射强度有关,但单一气象要素无法准确反映出热环境对人体的综合影响,为此引入人体热量平衡模型以及 PMV 指数。设定 35 岁、身高 170 cm、体重 63 kg、衣着系数为 0.5 的男性为代表人群。PMV 指数与中暑就诊率相关系数为 0.56,高于任何单一气象要素与就诊率的相关系数,说明 PMV 指标与中暑就诊率相关性更强,在预测中暑就诊率时比其他气象要素更具优势。图 6 给出不同 PMV 指数对应的中暑相对危险度 RR 值,由图发现:PMV 指数在 0~1 时,RR 值缓慢增长;PMV 指数在 1~2 时,RR 值快速增长,PMV 指数为 2 时的 RR 值为 2.99,中暑危险度增加约 1 倍;PMV 指数

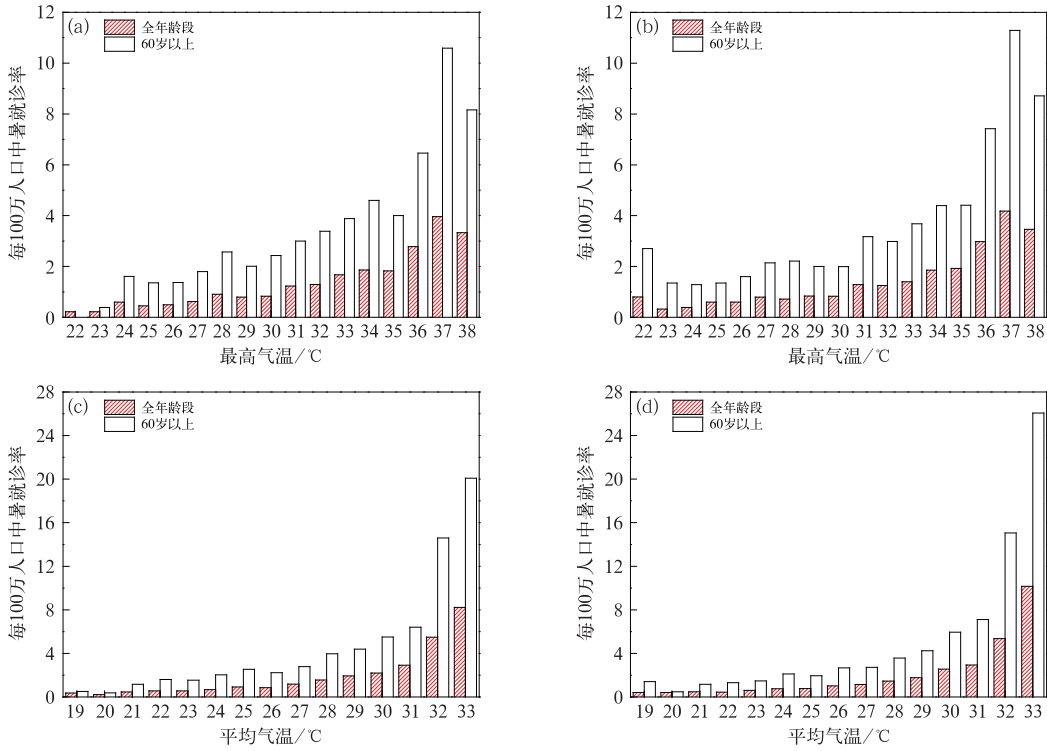
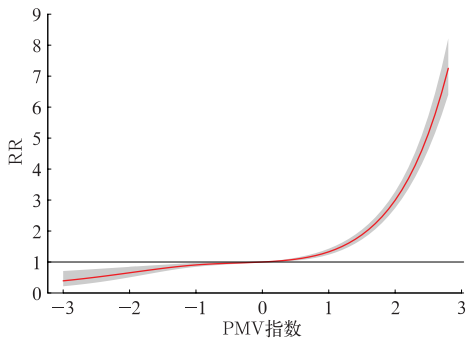


图 5 2016—2020 年天津夏季中暑就诊率随(a,c)当日、(b,d)次日(a,b)最高气温和(c,d)平均气温的变化

Fig. 5 Heatstroke visiting rate changing with (a, b) maximum temperature and (c, d) average temperature of (a, c) that day, (b, d) the next day of Tianjin in summer from 2016 to 2020



注：灰色阴影代表相对危险度的 95% 置信区间，水平实线代表相对危险度为 1。

图 6 2016—2020 年天津夏季 PMV 指数与中暑风险的暴露-反应关系

Fig. 6 Exposure-response curve between PMV index and relative risks of heatstroke of Tianjin in summer from 2016 to 2020

大于 2 后,RR 值几乎呈线性增长,PMV 指数为 2.8 时的 RR 值为 7.25,中暑危险度增加 6 倍。

2.3 中暑气象风险预报预警模型建立

前述研究表明中暑气象风险在不同人群中具有较

大差异。PMV 在计算过程中考虑了人体新陈代谢,可以反映出不同人群对于热响应的差异。按全年龄段人群和 60 岁以上人群分别建立中暑气象风险预报预警模型,且考虑气象条件对中暑影响的滞后性,以当日和前一日 PMV 值作为参数建立方程,模型使用参数包括当日 PMV 值、前一日 PMV 值,采用回归方程拟合,当日 PMV 值的系数取 0.446,前日 PMV 值的系数取 0.507,结合中暑就诊率情况建立中暑指数(Heat)多项式(选取 PMV 大于 0 的样本),拟合数据和实况数据相关系数达到 0.79。具体公式如下:

$$PMV_{全} = 0.47PMV_{全}^* + 0.53PMV_{全}^{**} \quad (3)$$

$$Heat = 1.1178PMV_{全}^3 -$$

$$3.1977PMV_{全}^2 + 3.6014PMV_{全} \quad (4)$$

$$PMV_{60} = 0.47PMV_{60}^* + 0.53PMV_{60}^{**} \quad (5)$$

$$Heat_{60} = 3.3722PMV_{60}^3 -$$

$$9.8367PMV_{60}^2 + 10.435PMV_{60} \quad (6)$$

式中: $PMV_{全}$ 表示全年龄段人群综合 PMV, $PMV_{全}^*$ 表示当日值, $PMV_{全}^{**}$ 表示前日值; PMV_{60} 表示 60 岁以上人群综合 PMV, PMV_{60}^* 表示当日

值, PMV_{60}^{**} 表示前日值; Heat 表示全年龄段人群中暑指数, $Heat_{60}$ 表示 60 岁以上人群中暑指数。

根据以上研究, 基于人群日均中暑就诊率数据, 将中暑气象风险预警等级由低到高分为 5 级, 中暑就诊率小于 1.5 时为中暑气象风险预警 1 级, 人群基本不会中暑; 中暑就诊率达到 1.5~2.65 时为 2 级, 人群的中暑风险一般, 其中当 60 岁以上人群就诊率大于 5.2 时需作出相应提示; 中暑就诊率达到 2.65~5 为 3 级, 人群比较容易中暑, 该级别也是预警的阈值, 达到该级别即建议向社会发布中暑气

象风险黄色预警; 中暑就诊率为 5~7 设置为 4 级, 人群容易中暑, 建议发布中暑气象风险橙色预警; 中暑就诊率达到或超过 7 时为 5 级, 人群很容易中暑, 建议发布中暑气象风险红色预警。根据每级中暑就诊率对应得到等效 PMV 值, 该 PMV 值可作为预报预警的指标, 将预报得到的气象要素输入 RayMan 模型, 即可得到预报 PMV 值, 与表格中的等效 PMV 值进行比较, 根据预报 PMV 值所在落区判断中暑气象风险预警级别。

表 1 天津中暑气象风险预警相关指标及防御建议
Table 1 Heatstroke meteorological risk early warning indicators and defense recommendations in Tianjin

占全年样本 累计百分比	日均中暑 就诊率	等效 PMV 值	预警 等级	预警 级别	防御建议
92.4%	$(-\infty, 1.5)$	$(-\infty, 1.2)$	1 级	无	中暑风险: 基本不会中暑
97.3%	$[1.5, 2.65)$	$[1.2, 2)$	2 级	无	中暑风险: 一般 1. 室外作业者需要预防中暑 2. 当老年人群就诊率大于 5.2 时, 提示对老、弱、病、幼人群提供防暑降温指导
99.2%	$[2.65, 5)$	$[2, 2.4)$	3 级	黄色	中暑风险: 比较容易中暑 1. 有关部门和单位按照职责做好防暑降温准备工作 2. 午后尽量减少户外活动 3. 对老、弱、病、幼人群提供防暑降温指导 4. 老年人、高温条件下作业和需要长时间进行户外露天作业的人员应当采取必要的防护措施
99.8%	$[5, 7)$	$[2.4, 2.6)$	4 级	橙色	中暑风险: 容易中暑 1. 有关部门和单位按照职责落实防暑降温保障措施 2. 尽量避免在高温时段进行户外活动, 高温条件下作业的人员应当缩短连续工作时间 3. 老、弱、病、幼人群应停止活动或体力劳动, 减少代谢率, 积极采取散热、降温、降温等防护措施
100%	$[7, \infty)$	$[2.6, \infty)$	5 级	红色	中暑风险: 很容易中暑 1. 有关部门和单位按照职责采取防暑降温应急措施 2. 停止户外露天作业(除特殊行业外) 3. 老、弱、病、幼人群特别是老年人应停止活动或体力劳动, 减少代谢率, 积极采取散热、降温、降温等防护措施

2.4 中暑气象风险预警模型检验

中暑气象风险预警需要解决两个问题。一是能否准确预报连续中暑高发事件风险预警的启动和解除时机。2016—2020 年共出现 6 次中暑高发连续事件, 使用该模型, 设定中暑指数 $Heat \geq 2.65$ 为指标, 6 次事件中有 5 次均可以有效通过指标启动, 仅 7 月 16—23 日事件, 未达到中暑气象风险预警启动标准(Heat 为 2.42), 属漏报。相比高风险连续事件的提示, 单日中暑高发事件的预报偏差略大, 其准确率约 50%, 究其原因, 除了模型有待改进外, 单日

中暑高发事件不仅受气象条件影响, 也受周末效应、节假日等气象因素以外的社会因素影响, 在模型中未予考虑。在准确作出高风险提示的基础上, 尽量减少空报是本研究的初衷, 经反算, 2016—2020 年共空报 2 次持续 2 天及以上的中暑高发连续事件, 空报 3 次单日事件; 而如果使用最高气温大于 35℃ 的高温预警指标代替中暑气象风险预警指标, 则空报 7 次中暑高发连续事件和 10 次单日事件; 相比而言, 本研究方法的空报率大幅度降低。这也表明, 中暑气象风险预报预警和高温预警虽然有相似之处, 但在预测中暑高发事件方面仍有较大区别。二是能

否准确预报中暑气象风险预警等级。经反算,本研究使用的中暑气象风险 1 级预警准确率为 84%, 2 级预警准确率为 60%, 3~5 级预警准确率为 60%, 说明本方法可以有效对单日中暑事件的气象风险作出提示。

经检验分析,对于中暑高发连续事件的预测,启动预警和解除预警的指标有一定区别,启动黄色预警标准设定为 $\text{Heat} \geq 2.65$, 且预报 3 级预警;解除预警标准以 $\text{Heat} < 1.5$ 较为合适,这可能是模型构建时重点考虑了当日和前日的气象条件,对于连续性过程,一旦气象条件有利于触发中暑,后续中暑就诊人数的下降,需要更有利的气象条件出现。鉴于中暑高发事件大多连续出现的特征,在应用此预警方法时,考虑到高温等气象条件对人体中暑风险的滞后性,一旦符合连续 2 天 $\text{Heat} \geq 2.65$ 的条件,后续多日的中暑气象风险均可以调整为 3 级及以上,直到 $\text{Heat} < 1.5$ 。基于该标准调整后,3~5 级中暑气象风险预警的准确率由 60% 提升至 82%, 可明显提升中暑气象风险预警准确率。以 2019 年 7 月 18 日至 8 月 4 日连续中暑高发事件为例,利用本研究的中暑气象风险预警算法和当日气象条件,计算得到预报中暑气象风险等级,与实际中暑就诊率得到的实况中暑气象风险等级进行了比较,如图 7。经分析发现从 7 月 24 日到 8 月 1 日,预报和实况基本吻合,且 7 月 26 日的峰值强度为 4 级,也比较一致。如果采用最高气温大于 35°C 为指标,仅 7 月 21 日, 24—27 日共 5 天符合条件,漏报了 7 月 28 日至 8 月 1 日的中暑高发事件,准确率仅为实际中暑高风险日的一半,且开始日期、峰值和结束日期均与实际

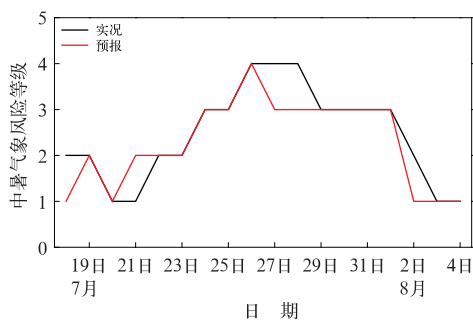


图 7 2019 年 7 月 18 日至 8 月 4 日天津中暑气象风险等级实况和预报结果对比图

Fig. 7 Comparative analysis of results calculated from observation data and forecasted heatstroke meteorological risk levels in Tianjin from 18 July to 4 August 2019

中暑就诊率变化不一致,由此说明中暑气象风险预警在应对高温天气对人体健康影响方面的意义和价值。

3 结论与讨论

本文基于 2016—2020 年天津市中暑就诊数据和同期气象数据,发现中暑事件集中出现在每年 6 月下旬到 8 月上旬,中暑就诊率在不同人群中具有显著差异,男性、大于 60 岁的人群中暑就诊率更高。分析了不同气象要素与中暑就诊率的关系,发现中暑就诊率与平均气温、最高气温、相对湿度、太阳辐射强度呈正相关,与平均气温相关性最强,与风速呈负相关。相对其他气象因素,PMV 指数与中暑就诊率的相关性更高。基于 PMV 指数建立了全年龄段人群和 60 岁以上人群的中暑气象风险预警指标,通过多项式拟合建立预报回归方程,其预报就诊率数据和实况就诊率数据相关系数可以达到 0.79,经检验该方程在预测中暑高发事件方面具有显著优势,在指导公众应对高温热浪天气,规避中暑风险方面具有积极意义。以上结论与北京、武汉、上海、南京等大城市先后开展的中暑气象风险预报(杨宏青等,2000;焦艾彩等,2001;谈建国等,2002;张德山等,2005;陈正洪等,2008;黄卓等,2011;陈静等,2013)结论基本一致,均能通过预报气象要素计算中暑气象风险等级,从而提前向公众发布提示,以规避可能发生的中暑风险。

中暑不仅与气象条件密切相关,也与人群所处环境、活动强度等密切相关,本文研究主要基于人群的年龄差异,以及由于年龄差异导致的代谢和热环境响应程度差异,进行了分类别的中暑气象风险预报预警技术研究。在未来的研究中,应该进一步考虑不同人群活动强度和建筑物对中暑的影响。同时,人群对热环境的适应不仅具有长期的适应能力,也具有短期适应性,在中暑气象风险预警模型中亟待考虑。综上所述,高温、高湿等气象要素能增加中暑门诊和住院的就诊风险,且存在着滞后效应。基于该研究的结果,应注重防范气象要素对中暑发病的影响,尤其要加强对老、弱、病、幼等人群的预防和保护。

参考文献

陈静,韩军彩,张素果,等,2013. 基于暑热指数的河北省中暑气象等

- 级预报指标研究[J]. 气象与环境学报, 29(5): 86-91. Chen J, Han J C, Zhang S G, et al, 2013. Study on forecast element of heat stroke weather grade based on hotness index in Hebei Province[J]. J Meteor Environ, 29(5): 86-91(in Chinese).
- 陈正洪, 史瑞琴, 李松汉, 等, 2008. 改进的武汉中暑气象模型及中暑指数等级标准研究[J]. 气象, 34(8): 82-86. Chen Z H, Shi R Q, Li S H, et al, 2008. Developed model between heatstroke and meteorological factors and standard for heatstroke index grades in Wuhan[J]. Meteor Mon, 34(8): 82-86(in Chinese).
- 付桂琴, 陆倩, 张亚男, 2022. 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, 80(3): 403-409. Fu G Q, Lu Q, Zhang Y N, 2022. Analysis of the influence of high temperature, heatwave and sweltering weather on the death number of cardiovascular and cerebrovascular diseases in Shijiazhuang [J]. Acta Meteor Sin, 80(3): 403-409(in Chinese).
- 付文娟, 郭冬梅, 王瑛, 等, 2020. 2009—2017年武汉市中暑流行病学特征及气象影响[J]. 职业与健康, 36(8): 1087-1090. Fu W J, Guo D M, Wang Y, et al, 2020. Epidemiological characteristics and meteorological effects of heatstroke in Wuhan City from 2009 to 2017[J]. Occupat Health, 36(8): 1087-1090 (in Chinese).
- 何玲玲, 陈正洪, 2009. 武汉市居民中暑与气象因子的统计特点研究[J]. 气候与环境研究, 14(5): 531-536. He L L, Chen Z H, 2009. Statistical properties of the heat stroke events in Wuhan residents and meteorological factors[J]. Climatic Environ Res, 14(5): 531-536(in Chinese).
- 何权, 何祖安, 郑有清, 1990. 炎热地区热浪对人群健康影响的调查[J]. 环境与健康杂志, 7(5): 206-211. He Q, He Z A, Zheng Y Q, 1990. Study of the heat wave effect on human health[J]. J Environ Health, 7(5): 206-211(in Chinese).
- 黄照, 刘涛, 许燕君, 等, 2018. 基于死亡数据用DLNM构建气象健康指数[J]. 环境卫生学杂志, 8(5): 368-373, 380. Huang Z, Liu T, Xu Y J, et al, 2018. Based on death information and using DLNM to develop a meteorological health index[J]. J Environ Hyg, 8(5): 368-373, 380(in Chinese).
- 黄卓, 陈辉, 田华, 2011. 高温热浪指标研究[J]. 气象, 37(3): 345-351. Huang Z, Chen H, Tian H, 2011. Research on the heat wave index[J]. Meteor Mon, 37(3): 345-351(in Chinese).
- 焦艾彩, 朱定真, 陶玫, 等, 2001. 南京地区中暑天气条件指数研究预报[J]. 气象科学, 21(2): 246-252. Jiao A C, Zhu D Z, Tao M, et al, 2001. The research and prediction for heat illness weather condition index in Nanjing Region[J]. Sci Meteor Sin, 21(2): 246-252(in Chinese).
- 李兰玉, 罗斌, 王搏, 等, 2022. 大气环境湿度对过敏性鼻炎的影响分析——以甘肃省三个城市研究为例[J]. 气象, 48(8): 1062-1069. Li L Y, Luo B, Wang B, et al, 2022. Effect of environmental humidity on the allergic rhinitis—a study of three cities in Gansu Province[J]. Meteor Mon, 48(8): 1062-1069 (in Chinese).
- 陆开来, 班婕, 王倩, 等, 2022. 不同气候变化情景下未来中国热相关死亡风险的预估[J]. 气象学报, 80(3): 349-357. Lu K L, Ban J, Wang Q, et al, 2022. Prediction of future heat-related death risk in China under different climate change scenarios[J]. Acta Meteor Sin, 80(3): 349-357(in Chinese).
- 鹿文涵, 谷少华, 孙仕强, 等, 2022. 沿海城市极端气温对脑卒中死亡的滞后定量影响[J]. 气象学报, 80(3): 449-459. Lu W H, Gu S H, Sun S Q, et al, 2022. Quantitative lagged effects of extreme temperature on stroke deaths in a coastal city[J]. Acta Meteor Sin, 80(3): 449-459(in Chinese).
- 施洪波, 2011. 1960—2008年京津冀地区夏季高温日数的变化趋势分析[J]. 气象, 37(10): 1277-1282. Shi H B, 2011. Analysis of trends in the variability of summer high temperature days during 1960—2008 in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Meteor Mon, 37(10): 1277-1282(in Chinese).
- 孙庆华, 张翼, 周连, 等, 2016. 南京市温度对死亡的急性效应研究[J]. 环境与健康杂志, 33(3): 193-197. Sun Q H, Zhang Y, Zhou L, et al, 2016. Short-term effects of ambient temperature on mortality in Nanjing[J]. J Environ Health, 33(3): 193-197 (in Chinese).
- 谭冠日, 黄劲松, 1990. 气候影响评价的两种统计学方法——论广州天气对死亡率的影响[J]. 南京气象学院学报, 13(3): 359-367. Tan G R, Huang J S, 1990. Two statistical procedures used in climatic assessment—an investigation of weather/mortality relationship in Guangzhou[J]. J Nanjing Inst Meteor, 13(3): 359-367(in Chinese).
- 谈建国, 黄家鑫, 2004. 热浪对人体健康的影响及其研究方法[J]. 气候与环境研究, 9(4): 680-686. Tan J G, Huang J X, 2004. The impacts of heat waves on human health and its research methods [J]. Climatic Environ Res, 9(4): 680-686(in Chinese).
- 谈建国, 殷鹤宝, 林松柏, 等, 2002. 上海热浪与健康监测预警系统[J]. 应用气象学报, 13(3): 356-363. Tan J G, Yin H B, Lin S B, et al, 2002. Shanghai heat wave/health warning system[J]. J Appl Meteor Sci, 13(3): 356-363(in Chinese).
- 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队, 2020. 天津统计年鉴(2019)[EB/OL]. <https://stats.tj.gov.cn/nianjian/2019nj/zk/indexch.html>. Tianjin Municipal Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Tianjin Survey Team, 2020. Tianjin Statistical Yearbook (2019)[EB/OL]. <https://stats.tj.gov.cn/nianjian/2019nj/zk/indexch.html>(in Chinese).
- 天津市卫生健康委员会, 2020. 天津市居民健康状况报告(2018年度)[EB/OL]. [https://wsjk.tj.gov.cn/ZWKG3158/ZFXXGK5869/FDZDGK-NR4356/tjxxn/202011/t20201110_4051173.html](https://wsjk.tj.gov.cn/ZWKG3158/ZFXXGK5869/FDZDGKNR4356/tjxxn/202011/t20201110_4051173.html). Tianjin Municipal Health Commission, 2020. Tianjin Municipal Residents' Health Status Report (2018) [EB/OL]. https://wsjk.tj.gov.cn/ZWKG3158/ZFXXGK5869/FDZDGK-NR4356/tjxxn/202011/t20201110_4051173.html(in Chinese).
- 卫捷, 孙建华, 2007. 华北地区夏季高温闷热天气特征的分析[J]. 气候与环境研究, 12(3): 453-463. Wei J, Sun J H, 2007. The analysis of summer heat wave and sultry weather in North China[J]. Climatic Environ Res, 12(3): 453-463(in Chinese).
- 吴锦成, 朱焯, 刘懿, 等, 2022. 中国热浪时空变化特征分析[J]. 水文, 42(3): 72-77. Wu J C, Zhu Y, Liu Y, et al, 2022. Spatial-temporal

- characteristics of heat waves in China[J]. *J China Hydrol*, 42(3):72-77(in Chinese).
- 杨宏青,陈正洪,刘建安,等,2000.武汉市中暑发病的流行病学分析及统计预报模型的建立[J].*湖北中医学院学报*,2(3):51-52,62. Yang H Q, Chen Z H, Liu J A, et al, 2000. Epidemiological analysis on heat invasion and establishment of its statistical forecast model in Wuhan[J]. *J Hubei College TCM*, 2(3):51-52,62(in Chinese).
- 杨仁庆,董继元,王雁茹,等,2023.日均气温对兰州市支气管炎影响的时间序列分析[J].*气象*,49(3):340-350. Yang R Q, Dong J Y, Wang Y R, et al, 2023. Effect of daily mean temperature on bronchitis outpatient visit in Lanzhou: a time-series study[J]. *Meteor Mon*, 49(3):340-350(in Chinese).
- 张德山,邓长菊,尤焕苓,等,2005.北京地区中暑气象指数预报与服务[J].*气象科技*,33(6):574-576. Zhang D S, Deng C J, You H L, et al, 2005. Heatstroke index forecast and service in Beijing Area[J]. *Meteor Sci Technol*, 33(6):574-576(in Chinese).
- 张可慧,2011.全球气候变暖对京津冀地区极端天气气候事件的影响及防灾减灾对策[J].*干旱区资源与环境*,25(10):122-125. Zhang K H, 2011. The impacts of global climate change on extreme weather events in Beijing-Tianjin-Hebei Area and the countermeasures for disaster prevention[J]. *J Arid Land Resour Environ*, 25(10):122-125(in Chinese).
- Brooke A G, Bell M L, 2011. Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U. S. communities[J]. *Environ Health Perspect*, 119(2):210-218.
- Conti S, Meli P, Minelli G, et al, 2005. Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy[J]. *Environ Res*, 98(3):390-399.
- Fanger P O, 1970. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*[M]. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Gasparrini A, Armstrong B, Kenward M G, 2010. Distributed lag non-linear models[J]. *Stat Med*, 29(21):2224-2234.
- Hastie T, Tibshirani R, 1986. Generalized additive models[J]. *Stat Sci*, 1(3):297-318.
- Huynen M M, Martens P, Schram D, et al, 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population[J]. *Environ Health Perspect*, 109(5):463-470.
- Kalkstein L S, Greene J S, 1997. An evaluation of climate/mortality relationships in large U. S. cities and the possible impacts of a climate change[J]. *Environ Health Perspect*, 105(1):84-93.
- Matzarakis A, Rutz F, Mayer H, 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model[J]. *Int J Biometeor*, 51(4):323-334.
- Matzarakis A, Rutz F, Mayer H, 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments; basics of the RayMan model[J]. *Int J Biometeor*, 54(2):131-139.
- Nikolopoulou M, Lykoudis S, 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries[J]. *Build Environ*, 41(11):1455-1470.
- Saucy A, Ragetti M S, Vienneau D, et al, 2021. The role of extreme temperature in cause-specific acute cardiovascular mortality in Switzerland: a case-crossover study[J]. *Sci Total Environ*, 790:147958.
- Schneider A, Ruckerl R, Breitner S, et al, 2017. Thermal control, weather, and aging[J]. *Curr Environ Health Rep*, 4(1):21-29.
- Whitman S, Good G, Donoghue E R, et al, 1997. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave[J]. *Am J Public Health*, 87(9):1515-1518.
- Yan M L, Xie Y, Zhu H H, et al, 2023. Cardiovascular mortality risks during the 2017 exceptional heatwaves in China[J]. *Environ Int*, 172:107767.

(本文责编:戴洋)