

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-115-06

基于室内 WBGT 的中暑发病率预测模型

王若睿¹ 刘书晓¹ 邹 钺¹ 刘 贇²

(1. 东华大学环境科学与工程学院 上海 201620;

2. 典唯科技股份有限公司 上海 201602)

【摘要】 近年来,随着全球变暖的加剧,高温中暑的发病率越来越普遍。利用日本四个地区六年间 6 月-9 月的救护车每日中暑运输记录和气象数据,确定中暑的潜在危险因素,建立可靠的中暑发病率预测模型。结果表明,室内湿球黑球温度(WBGT)每日温度最高五小时的平均温度与中暑发病率相关性最佳;连续高温天数对中暑发生过程中人体热适应的作用规律在预测中暑患者数量的高峰期和夏末患者数量方面表现优异。该预测模型可为相关人员制定减少中暑患者和保障应急运输安全的策略提供可靠依据。

【关键词】 中暑发病率;室内 WBGT;连续高温天数;热适应
中图分类号 R594.1 文献标志码 A

Prediction Model for Heatstroke Incidence Based on Indoor WBGT

Wang Ruorui¹ Liu Shuxiao¹ Zou Yue¹ Liu Yun²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620;

2. Dianwei Science Co., Ltd, Shanghai, 201602)

【Abstract】 In recent years, with the intensification of global warming, the incidence of heatstroke in high temperatures has become increasingly common. This article utilizes the daily records of heatstroke transports by ambulances and meteorological data from four regions in Japan over six years (June to September) to identify potential risk factors for heatstroke and establish a reliable prediction model for its occurrence. The results show that the average temperature of the indoor wet bulb globe temperature (WBGT) during the five hottest hours of the day has the strongest correlation with the incidence of heatstroke. The effect of consecutive hot days on the process of heat adaptation in the human body performs exceptionally well in predicting the peak period of heatstroke cases and the number of patients towards the end of summer. This prediction model can provide reliable evidence for relevant personnel to develop strategies to reduce heatstroke cases and ensure the safety of emergency transportation.

【Keywords】 Incidence of heat stroke; Indoor WBGT; Consecutive high temperature days; Thermal adaptation

0 引言

在日本,城市热岛效应和气候变化导致夏季气温显著升高,日本频繁而强烈的高温天气对健康产生不可避免的影响^[1],中暑是最具威胁性的热相关疾病之一^[2]。据日本总务省消防灾害管理厅统计,

每年夏天大约有 4 万人因为与热有关的疾病紧急送医,大量中暑患者成为急救医疗服务的沉重负担^[3]。研究表明,中暑发病率与环境条件存在显著相关性。李明^[4]和 Ono^[5]的研究指出中暑病例数与每日最高温度之间存在强相关性。Budd^[6]将每日环

作者简介:王若睿(1996-),女,在读硕士研究生,研究方向为人体热舒适, E-mail: w1585450211@163.com

通讯作者:邹 钺(1969-),男,博士,副教授, E-mail: zouyue123@yahoo.com

收稿日期:2024-07-23

境温度或湿黑球温度 (WBGT) 的峰值作为评估热相关疾病的主要指标。上述研究都讨论了瞬时值之间的相关性, 然而人的生理状态会随着时间的推移而变化^[7]。此外, 目前还没有将环境条件的时间过程与中暑发病率联系起来的标准方法。尽管已经有多项研究^[8,9]提出持续的高温天气会导致热相关疾病的发病率和死亡率显著增加, 但连续高温天数下热负荷累积效应对中暑患者数量的影响目前尚未得到广泛讨论。本研究基于日本中暑患者的数据库, 探讨影响中暑患者人数的相关因素, 开发和验证中暑发病率的预测模型。该模型对于相关人员制定和实施相关的公共卫生干预计划至关重要, 并显著提高救护车调度和卫生服务体系的运作效率。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本研究选取东京都、大阪府、埼玉县以及爱知县四个区域作为研究对象。据总务省消防厅统计, 在日本 47 个行政区中, 所选区域在 2023 年的中暑紧急运送次数位居前四位, 分别为 7325、5719、5422 和 5951 次, 占日本全国中暑紧急运送次数的 1/3。

中暑病例数来源于日本总务省消防灾害管理厅提供的每年 6 月至 9 月由救护车转运的中暑患者的报告。选取六个中暑病例数较多的年份, 包括 2010 年、2013 年以及 2016 年至 2019 年的数据作为训练数据, 以及使用 2020 年 6 月至 9 月的数据作为预测数据。

选取环境温度、室外 WBGT 和室内 WBGT 三个热应力评价指标作为解释变量。研究期间的环境温度、湿球温度等气象资料由日本气象厅提供。室外 WBGT 数据来源于日本环境部防暑网站。室内 WBGT 的计算公式^[10]见式 (1)。

$$WBGT = 0.7T_s + 0.3T_a \quad (\text{无太阳辐射}) \quad (1)$$

式中: T_s 为湿球温度; T_a 为干球温度。

1.2 研究方法

每个区域的中暑发病率定义为每万人每天中暑发生的频率, 参考 Akatsuka^[11]的热症发病率公式, 本研究使用中暑发病率公式见式 (2)。

$$I = \frac{F \times 10^4}{P \times D_{HSI}} \quad (2)$$

式中: F 为每个区域因中暑被转运的患者频率, 人; P 为每个区域的总人口, 人; D_{HSI} 为每个区域在热应力评价指标温度区间 (即 1°C) 内出现的天数, 天。

当中暑发病率达到 0.05 时, 相应的评价指标数值被定义为高温阈值, 超过高温阈值的天气出现且无间断时的天数定义为连续高温天数。连续高温天数对中暑发病率的影响分析推导如下:

(1) 首先将每个区域训练数据中各指标下的连续高温过程筛选出来, 得到连续高温第 t 天对应的中暑发病率, 进一步研究各指标单值温度下的连续高温天数与中暑发病率, 关系式见式 (3)。

$$C(t) = dt^2 + et + f \quad (3)$$

式中: $C(t)$ 为单值温度下连续高温第 t 天对应的中暑发病率; t 为连续高温过程中的第 t 天; 参数 d 、 e 、 f 由最小二乘法拟合确定的常数。

(2) 假设每一单值温度下连续高温天气共有 n 天, 各指标在每一单值温度下中暑发病率的平均值定义为中暑平均发病率, 公式见式 (4)。

$$\overline{C(t)} = \frac{\sum_{t=1}^n C(t)}{n} \quad (4)$$

式中: $\sum_{t=1}^n C(t)$ 为各指标在每一单值温度下的连续高温天数对应中暑发病率的总和。

(3) 为方便计算, 对上述数据进行归一化处理, 公式见式 (5)。

$$\lambda_t = \frac{\overline{C(t)}}{C(t)} \quad (5)$$

式中: λ_t 代表不同高温天数下中暑发病率的修正系数。

1.3 统计方法

采用 Excel 2021 软件建立数据库, Origin 2022 和 Python 2.7.10 软件进行数据整理与分析, 用非线性回归分析方法进行预测模型的建立, p 值 < 0.05 认为有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 相关性分析

本研究调查了与中暑发病率相关性最高的指标。由于生理反应的时间过程对表征热相关疾病至关重要, 每天的最高温度出现在 11:00 至 16:00 之

间,这也是中暑患者呼叫救护车数量最为集中的时间段。因此本研究所选的三个指标(环境温度和室内外 WBGT)考虑了最高温度和每日温度最高五小时的平均温度。如表 1 所示,相较于最高温度,每日温度最高五小时的平均温度在三个指标下的决定系数较大。其中,室内 WBGT 的每日温度最高五小时的平均温度的决定系数最大。因此,在接下来的讨论中,选取基于室内 WBGT 的每日温度最高五小时平均温度值来评估中暑发病率。

表 1 各指标的决定系数

	环境温度	室内 WBGT	室外 WBGT
最高温度	0.8428	0.8265	0.8733
每日温度最高五小时平均温度	0.8645	0.8986	0.88

2.2 预测模型构建

中暑发病率与室内 WBGT 之间的关系如图 1 所示,中暑发病率随室内 WBGT 的增加呈指数上升的趋势。本研究的中暑发病率基础预测模型为:

$$A(x) = ae^{bx} \quad (6)$$

其中, $A(x)$ 表示全部人群中暑发病率; x 表示室内 WBGT 数值; 参数 a 、 b 由最小二乘法拟合确定的常数, 其中 $a=0.9 \times 10^{-7}$, $b=0.4838$ 。

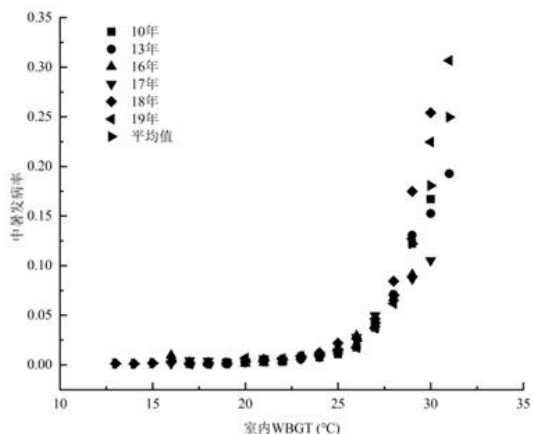


图 1 室内 WBGT 与中暑发病率的关系

Fig.1 Relationship between indoor WBGT and the incidence of heat stroke

利用上述所提出的方程(式(3) — (5))研究连续高温天数下热负荷累积效应对中暑患者数量的影响,图 2 显示了连续高温天数对中暑发病率的修正曲线,代表人体对高温环境的热适应程度。

当人体持续暴露在高温环境中,体内大量代谢产热产生的热负荷引起体温升高。在持续经历高温环境的初期,因人体无法有效地调节热负荷,中暑发病率持续增加,并在第 9~10 日达到最高。之后随着时间的推移,中暑发病率随着对热应激条件的适应而逐渐降低,直到连续高温的第 20 天可以完全适应。修正公式如式(7)、(8)所示。

$$(t) = 0.4942 + 0.1466t - 0.0069t^2 \quad t \leq 20 \quad (7)$$

$$\lambda(t) \approx 0.662 \quad t > 20 \quad (8)$$

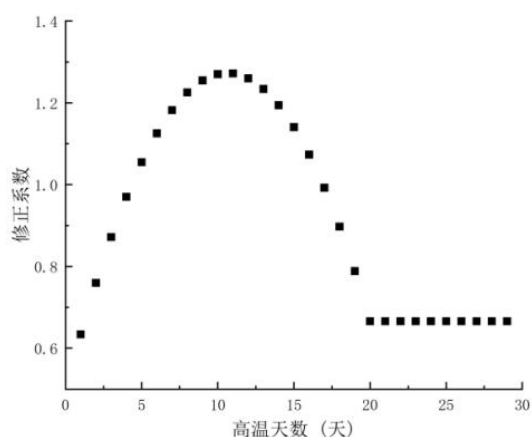


图 2 连续高温天数对中暑发病率的影响

Fig.2 The influence of consecutive high temperature days on the incidence of heat stroke

多项研究支持自然环境对夏季热适应的影响(即季节性热适应)[12,13],季节性热适应是一个持续发生在整个夏季的背景过程,理论上环境条件的季节性变化可以在夏末(8月20日至9月30日)诱导出与上述相同的完全热适应。连续高温天气主要集中在每年的七、八月份,因此,本研究还需要考虑夏末时季节性热适应对中暑发病率的影响。同时,为了提高模型准确性,忽略 2018 年 7 月 10 日至 7 月 31 日期间历史级别的暴雨导致洪水灾害发生期间的数据,修正后的中暑发病率预测模型见式(9)。

$$A(x) = ae^{bx} \lambda(t) \cdot q \quad (9)$$

其中, q 表示夏末(8月20日至9月30日)季节性热适应修正系数,为 0.662。

2.3 模型验证

为客观评价模型预测效果,本研究使用均方根

误差 (RMSE) 和平均绝对偏差 (MAE) [14] 进行不同模型间的比较。东京都在 6 个研究年份中记录了最多的中暑患者, 因此以其为代表性例子。图 3 对比了使用基础预测模型和修正后的预测模型得到的东京都在六年间的预测患者人数与实际患者人数。如图所示, 修正后的预测模型可以在整个夏季实现与实际患者人数的高匹配估计, 对预测患者数量峰值方面具有相对较高的准确性, 尤其是减少了

夏末对患者人数的高估。

表 2 列出了全部人群中暑患者预测误差比较。对比实际中暑患者人数, 基础预测模型的 RMSE 和 MAE 分别为 30 和 15.9, 而修正后的预测模型的 RMSE 和 MAE 分别为 20.4 和 11.5。相对于基础预测模型, 修正后的模型预测性能分别提高了 32% 和 27.7%。因此, 修正后的中暑发病率预测模型具有更高的准确性。

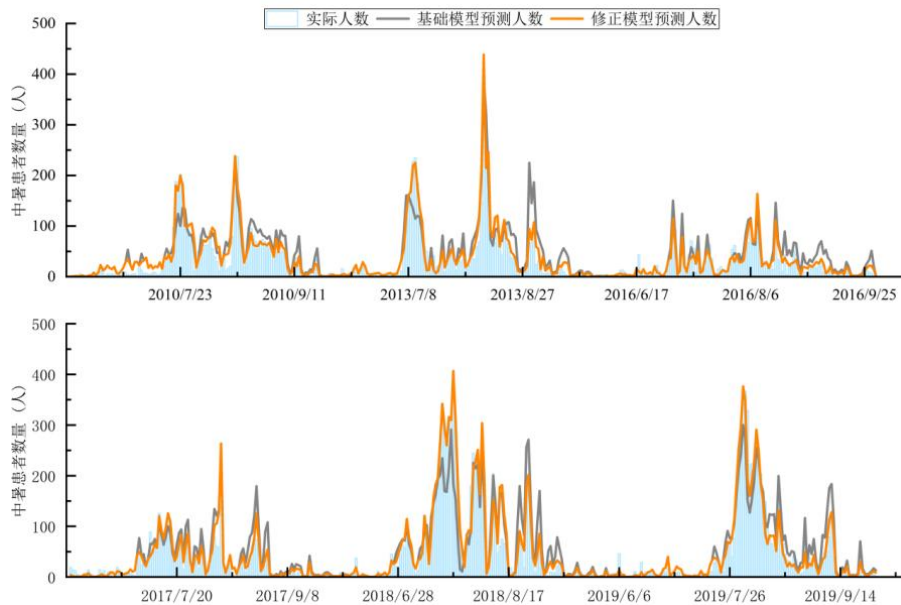


图 3 东京都的中暑患者数量预测

Fig.3 Forecast of the number of heatstroke patients in Tokyo

表 2 全部人群中暑预测误差

Table 2 Prediction error of heat stroke in whole population

室内 WBGT	基础预测模型	突发自然灾害忽略	连续高温修正	季节性热适应修正	整体修正预测模型
MAE	15.9	14.6	13.6	14.5	11.5
RMSE	30	26.6	25.8	27.4	20.4

2.4 模型测试

为了进一步探讨预测模型的有效性, 本研究比较了 2020 年期间东京都、大阪府、埼玉县和爱知县四个区域中暑患者预测人数与实际患者人数, 如图 4 所示。从图中可以看到修正模型的预测结果与实际人数基本一致。尽管两种模型在六月份都倾向于低估中暑患者数量, 这可能是因为在初夏时对热的适应程度低于夏末。但修正后的模型依旧能够准确估计中暑患者的峰值波动以及夏末的实际患者人数, 因此认为修正预测模型对中暑患者预测

具备较高的准确性和有效性。

然而, 这项研究有一些局限性, 研究主要集中在中暑患者数量较多的典型城市, 受研究样本量的限制, 预测模型并不适用于日本所有地区。如图 5 所示, 对于气候与东京都、爱知县相似的神奈川县, 预测模型的估计非常准确, 而对于气候类型与研究地区均不相同的福冈县, 预测误差较大。这表明提出的预测模型适用于气候参数与研究地区相似度较高的其他地区。

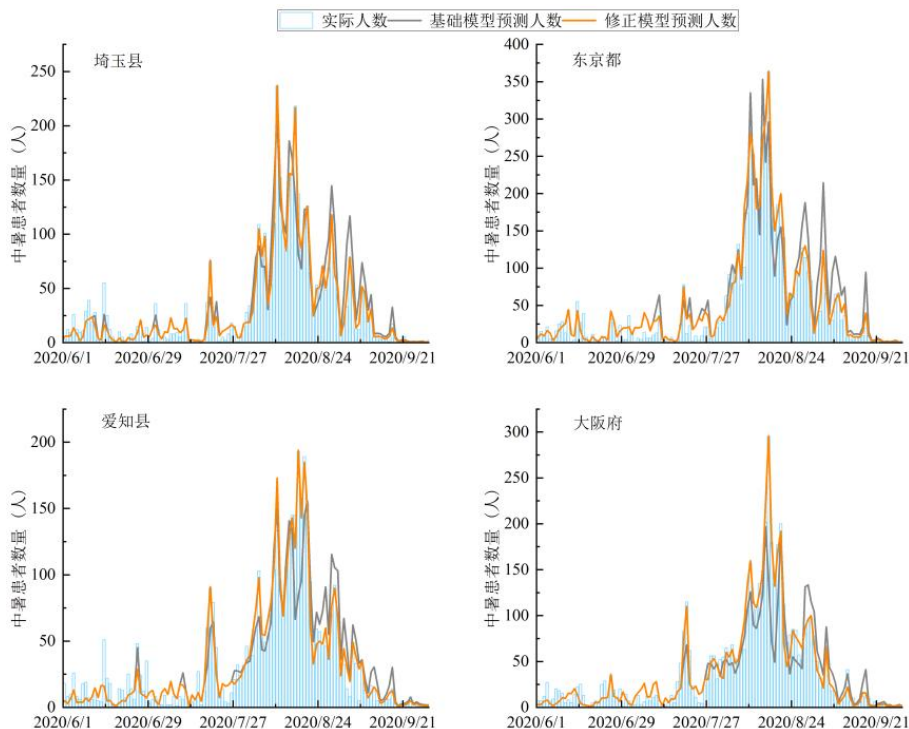


图 4 2020 年埼玉县、东京都和爱知县、大阪府中暑患者数量预测

Fig.4 Forecast of the number of heatstroke patients in Saitama, Tokyo, Aichi, and Osaka prefectures in 2020

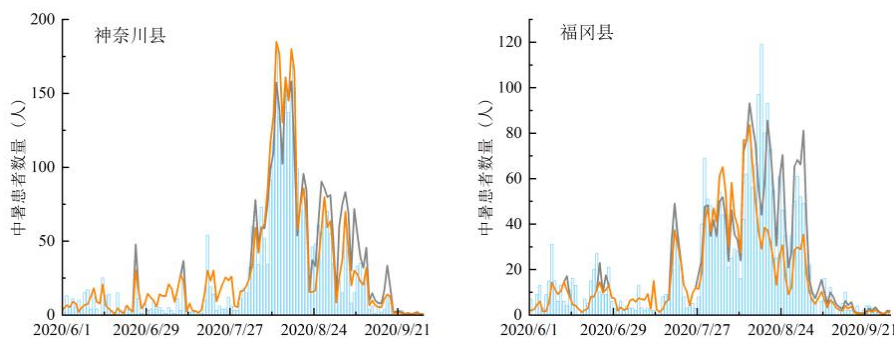


图 5 2020 年神奈川县、福冈县中暑患者数量预测

Fig.5 Forecast of the number of heat stroke patients in Kanagawa Prefecture and Fukuoka Prefecture in 2020

3 结论

本文通过分析日本 4 个地区(东京都、大阪府、埼玉县、爱知县)六年间 6 月—9 月的救护车每日中暑运输记录和气象数据,考虑连续高温天数、季节性热适应和突发自然灾害等因素对中暑患者的影响,结论如下:

(1) 室内 WBGT 每日温度最高五小时的平均温度与中暑发病率有最强的相关性,表明环境条件的时间过程对表征热相关疾病更具相关性。

(2) 连续高温天数影响人体热适应能力,即

连续几天天气条件的影响,被认为会影响热相关疾病患者的数量,中暑患者达到完全热适应状态的天数为 20 天。

(3) 该预测模型在夏季中暑病例数激增的时期以及夏末适应高温后的患者数量方面表现出良好的预测效果,有助于相关人员制定减少中暑患者和保障应急运输安全的策略。

(4) 该预测模型存在一些局限性。本研究只针对日本的四个地区开发了预测模型,所提出的预测模型仅适用于气候参数与研究地区相似度较高

的其他地区,并不适用于日本所有地区。因此,有必要在其他地区开发单独的模型以提高中暑发病率预测模型的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] TOOSTY N T, HAGISHIMA A, TANAKA K I. Heat health risk assessment analysing heatstroke patients in Fukuoka City, Japan [J]. *PLoS One*, 2021,16(6): e0253011.
- [2] OGATA S, TAKEGAMI M, OZAKI T, et al. Heatstroke predictions by machine learning, weather information, and an all-population registry for 12-hour heatstroke alerts [J]. *Nature Communications*, 2021,12(1).
- [3] IKEDA T, KUSAKA H. Development of Models for Predicting the Number of Patients with Heatstroke on the Next Day Considering Heat Acclimatization [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2021,99(6):1395-412.
- [4] 李明,吴亚兰,郭江林,等.绍兴市居民高温中暑与气象因素的相关性研究[J].*预防医学*,2019,31(3):251-4.
- [5] ONO M. Heat stroke and the thermal environment [J]. *JMAJ-Japan Medical Association Journal*, 2013,56(3): 199-205.
- [6] BUDD G M. Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations [J]. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2008,11(1):20-32.
- [7] LI L, ZHA Y. Population exposure to extreme heat in China: Frequency, intensity, duration and temporal trends [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,60.
- [8] FAURIE C, VARGHESE B M, LIU J, et al. Association between high temperature and heatwaves with heat-related illnesses: A systematic review and meta-analysis [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,852.
- [9] 陈丽,宫志敏,应圣洁,等.2013-2018年上海市闵行区高温中暑与高温热浪的关系[J].*上海预防医学*,2021,33(8):726-31.
- [10] CHOWDHURY S, HAMADA Y, AHMED K S. Prediction and comparison of monthly indoor heat stress (WBGT and PHS) for RMG production spaces in Dhaka, Bangladesh [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017,29:41-57.
- [11] AKATSUKA S, UNO T, HORIUCHI M. The relationship between the heat disorder incidence rate and heat stress indices at Yamanashi Prefecture in Japan [J]. *Advances in Meteorology*, 2016,(1):9492815.
- [12] HORI S. Changes in physiological reactions to a hot environment induced by climatic change and physical training [J]. *Japanese Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1977,5(2):93-104.
- [13] INOUE Y, NAKAO M, OKUDAIRA S, et al. Seasonal variation in sweating responses of older and younger men [J]. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 1995,70(1):6-12.
- [14] WANG W, LU Y. Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model; proceedings of the IOP conference series: materials science and engineering, F, 2018[C]. IOP Publishing.