

# 高温健康风险预警的气象指标研究

谷少华, 陆蓓蓓, 王永, 金永高, 王爱红

宁波市疾病预防控制中心环境与职业卫生所, 浙江 宁波 315010

**摘要:** **目的** 探索高温健康风险预警的最适气象指标。**方法** 收集2013—2019年每年5—10月浙江省宁波市户籍人口死因监测资料、气象资料和空气质量监测资料;采用时间序列分析方法结合分布滞后非线性模型分别构建日最低气温、日均气温、日最高气温、日最低热指数、日均热指数、日最高热指数、日均体感温度和炎热指数8项气象指标与死亡数、寿命损失年(YLL)的关系模型,根据赤池信息量准则(AIC)最小化原则评价模型拟合效果;分析不同性别、年龄和死因人群高温健康风险预警最适气象指标。**结果** 研究期间宁波市共报告死亡120 628例,日均死亡94例,日均YLL率为19.74人年/10万。除日最低热指数和炎热指数外,其他6项气象指标与总死亡数、总YLL率的暴露-反应关系均为“J”型。日均气温与全人群、女性、≥65岁人群、循环系统疾病患者和呼吸系统疾病患者死亡数和YLL率关系模型的AIC值均最小,拟合效果均为最优。**结论** 日均气温与死亡数、YLL率的模型拟合效果均较好,更适用于高温健康风险预警。

**关键词:** 高温;气象指标;健康风险预警;死亡;寿命损失年

中图分类号: R122

文献标识码: A

文章编号: 2096-5087(2022)08-0803-07

## Identification of meteorological variables as predictors for forecasting health risks of high temperatures

GU Shaohua, LU Beibei, WANG Yong, JIN Yonggao, WANG Aihong

Department of Environmental and Occupational Health, Ningbo Center for Disease Control and Prevention, Ningbo, Zhejiang 315010, China

**Abstract: Objective** To identify the most appropriate meteorological variable for forecasting the health risk of high temperatures. **Methods** The surveillance on causes of death, meteorological data and surveillance on air quality among registered residents in Ningbo City, Zhejiang Province during the period between May and October from 2013 to 2019 were collected. The association models of daily minimum temperature, average daily temperature, daily maximum temperature, daily minimum heat index, average daily heat index, daily maximum heat index, average daily apparent temperature and torridity index with deaths and years of life lost (YLL) were created using time series analysis and distributed lag non-linear models, and the model fitting effect was evaluated using the minimum Akaike information criterion (AIC) procedure. The most appropriate meteorological variable for forecasting gender-, age- and mortality-specific health risks of high temperatures was identified. **Results** A total of 120 628 deaths were reported during the study period, with daily deaths of 94 cases, and daily YLL rate of 19.74 person-years/10<sup>5</sup>. Except for daily minimum heat index and torridity index, the exposure-response relationships between other six meteorological variables and deaths and overall YLL rate all appeared a “J” shape. The lowest AIC values and the optimal model fitting effects were measured for the association models between average daily temperature and whole populations, females, subjects at ages of 65 years and older, and deaths and YLL rates due to circulatory diseases and respiratory diseases. **Conclusion** High model fitting effects

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2022.08.010

**基金项目:** 浙江省公益技术研究项目(LGF19H260010);宁波市自然科学基金项目(2019A610379);宁波市医学重点学科(2022-B18);宁波市市级医疗品牌学科(PPXK2018-10)

**作者简介:** 谷少华, 硕士, 主管医师, 主要从事环境流行病学研究

**通信作者:** 王爱红, E-mail: wangah@nbcdc.org.cn

are observed between average daily temperature and deaths and YLL rates, which are more suitable for forecasting the health risk of high temperature.

**Keywords:** high temperature; meteorological variable; health risk forecast; mortality; years of life lost

政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 最新研究报告指出, 2011—2020 年全球平均气温相比工业化前 (1850—1900 年) 升高 1.09 °C, 预计未来会继续升高<sup>[1]</sup>。2019 年, 我国与高温热浪相关的死亡人数达到 26 800 人, 较 1990 年上升了 4 倍<sup>[2]</sup>。高温健康风险预警系统是应对全球气候变暖的重要措施, 能够有效降低极端高温导致的健康风险, 并已在多个国家取得良好效果<sup>[3-6]</sup>。然而, 国内外对预警指标的选择存在争议: 我国气象部门使用日最高气温 ( $\geq 35$  °C) 开展高温健康风险预警; 美国、加拿大和欧洲部分国家则采用日均气温、日最高气温、日最低气温、湿热指数、热指数和体感温度等指标<sup>[3, 6-7]</sup>。已有研究比较了不同气象指标与人群死亡关系模型的拟合优劣<sup>[8-12]</sup>, 但尚无统一结论, 缺乏针对其他健康结局的研究, 对高温效应的评估并不充分。

既往研究通常采用时间序列分析方法构建气象指标与人群健康结局的暴露-反应关系模型, 确定预警指标和预警等级<sup>[3, 6, 13]</sup>。分布滞后非线性模型 (distributed lag non-linear model, DLNM) 为暴露-反应关系添加滞后维度, 能够同时评估暴露因素的滞后效应和非线性效应, 拓展时间序列分析方法的应用范围<sup>[14]</sup>。本研究选取国内外文献中高温健康风险预警系统常用的 8 项气象指标, 采用时间序列分析方法比较不同气象指标与人群死亡数、寿命损失年 (years of life lost, YLL) 关系模型的拟合效果, 探索浙江省宁波市高温健康风险预警的最适气象指标。

## 1 资料与方法

**1.1 资料来源** 2013—2019 年宁波市户籍人口死因监测个案资料和户籍人口数据来自宁波市疾病预防控制中心, 同期气象资料来自宁波市气象局, 大气污染资料来自宁波市生态环境监测中心。

### 1.2 方法

**1.2.1 监测资料收集** 收集每年 5—10 月 (气温较高月份) 宁波市死亡人口的性别、年龄、死亡日期和死因等资料, 根据《疾病和有关健康问题的国际统计分类 (第十次修订本)》(ICD-10) 进行死因分类, 包括循环系统疾病 (I00~I99) 和呼吸系统疾病 (J00~J99)。参照 2013 年中国居民期望寿命表<sup>[15]</sup> 计算历年宁波市居民 YLL, 按日统计汇总, 计算每日 YLL 率。

收集同期气象资料, 包括: (1) 日最低气温、日均气温和日最高气温 3 项气温指标; (2) 日均相对湿度、日最小相对湿度、日均气压、日均风速和日降水量, 参考文献 [10, 13, 16] 计算日均体感温度、日最低热指数、日均热指数、日最高热指数和炎热指数 5 项生物气象指数。为控制空气污染物的混杂作用, 收集同期空气质量监测数据, 将细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 和臭氧 8 小时 (O<sub>3</sub>-8 h) 纳入分析。

**1.2.2 气象指标与死亡数、YLL 率的关系模型建立** 采用时间序列分析方法结合 DLNM 分别构建日最低气温、日均气温、日最高气温、日均体感温度、日最低热指数、日均热指数、日最高热指数和炎热指数 8 项气象指标与人群死亡数和 YLL 率的关系模型, 如下:

$$g[E(Y_t)] = cb(T_t, \text{lag}) + ns(t, 3/a) + ns(\text{PM}_{2.5t}, 3) + ns(\text{O}_{3t}, 3) + \text{DOW} + \alpha$$

式中:  $g$  为链接函数, 其中死亡数采用广义泊松分布<sup>[14]</sup>, YLL 率采用高斯分布<sup>[13]</sup>;  $E$  为期望值;  $Y_t$  为第  $t$  日的死亡数或 YLL 率;  $cb$  为交叉基函数;  $T_t$  为气象指标, 采用样条函数进行非线性拟合, 自由度选择 4<sup>[14]</sup>;  $\text{lag}$  为滞后时间, 选择最长滞后时间为 10 d<sup>[17]</sup>, 采用样条函数进行非线性拟合, 自由度选择 3<sup>[18]</sup>;  $ns$  为自然立方样条函数;  $t$  为时间变量, 自由度选择 3 a<sup>-1</sup><sup>[17]</sup>;  $\text{PM}_{2.5t}$  和  $\text{O}_{3t}$  分别为第  $t$  日的 PM<sub>2.5</sub> 日均质量浓度和 O<sub>3</sub>-8 h 质量浓度, 自由度均选择 3<sup>[18]</sup>;  $\text{DOW}$  为星期几, 按照哑变量纳入模型;  $\alpha$  为截距。采用相对危险度 (relative risk, RR) 表示气象指标与死亡数的关联强度。

**1.2.3 气象指标与死亡数、YLL 率的关系模型评价** 根据赤池信息量准则 (Akaike information criterion, AIC) 最小化原则评价模型拟合效果<sup>[14, 17-18]</sup>。通过在模型中加入日均相对湿度、改变时间变量自由度 (4 a<sup>-1</sup>)、改变气象指标自由度 (3 或 5)、改变最长滞后时间 (7 或 14 d) 等方法进行敏感性分析, 验证结果的稳定性。

**1.3 统计分析** 采用 R 3.5.3 软件统计分析。采用  $\text{dlm}$  程序包构建 DLNM。定量资料采用均数±标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 描述。检验水准  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

**2.1 宁波市户籍人口死亡情况和气象指标** 研究期间宁波市共报告死亡 120 628 例, 日均死亡 94 例;

其中男性、女性、<65岁人群、≥65岁人群、循环系统疾病患者和呼吸系统疾病患者日均死亡分别为54、40、21、73、27和11例。日均YLL率为19.74人年/10万，其中男性、女性、<65岁人群、≥65岁人群、循环系统疾病患者和呼吸系统疾病患者日均YLL率分别为23.33人年/10万、16.34人年/10万、11.56人年/10万、64.88人年/10万、4.15人年/10万和1.39人年/10万。

日最低气温、日均气温、日最高气温、日均体感温度、日最低热指数、日均热指数、日最高热指数和炎热指数分别为(21.65±4.26)℃、(24.85±4.21)℃、(29.13±4.92)℃、(21.00±4.24)℃、(24.53±3.97)℃、(27.58±6.07)℃、(36.89±12.31)℃和(27.24±4.10)℃。PM<sub>2.5</sub>日均质量浓度和O<sub>3</sub>-8h质量浓度分别

为(31.87±18.37) μg/m<sup>3</sup>和(107.40±41.28) μg/m<sup>3</sup>。

**2.2 气象指标与死亡数的关系** 除日最低热指数和炎热指数外，其他6项指标与总死亡数的暴露-反应关系均为“J”型，见图1。日均气温与全人群、女性、≥65岁人群、循环系统疾病患者和呼吸系统疾病患者死亡数关系模型的拟合效果最优。日均体感温度与男性死亡数关系模型的拟合效果最优，其次为日均气温和日最高气温。日最高热指数与<65岁人群死亡数关系模型的拟合效果最优，其次为日最高气温和日均气温。日最低热指数和炎热指数与不同人群死亡数关系模型的拟合效果均较差，见表1。敏感性分析结果显示，不同模型中日均气温与总死亡数的拟合效果均最优，结果稳定，见表2。

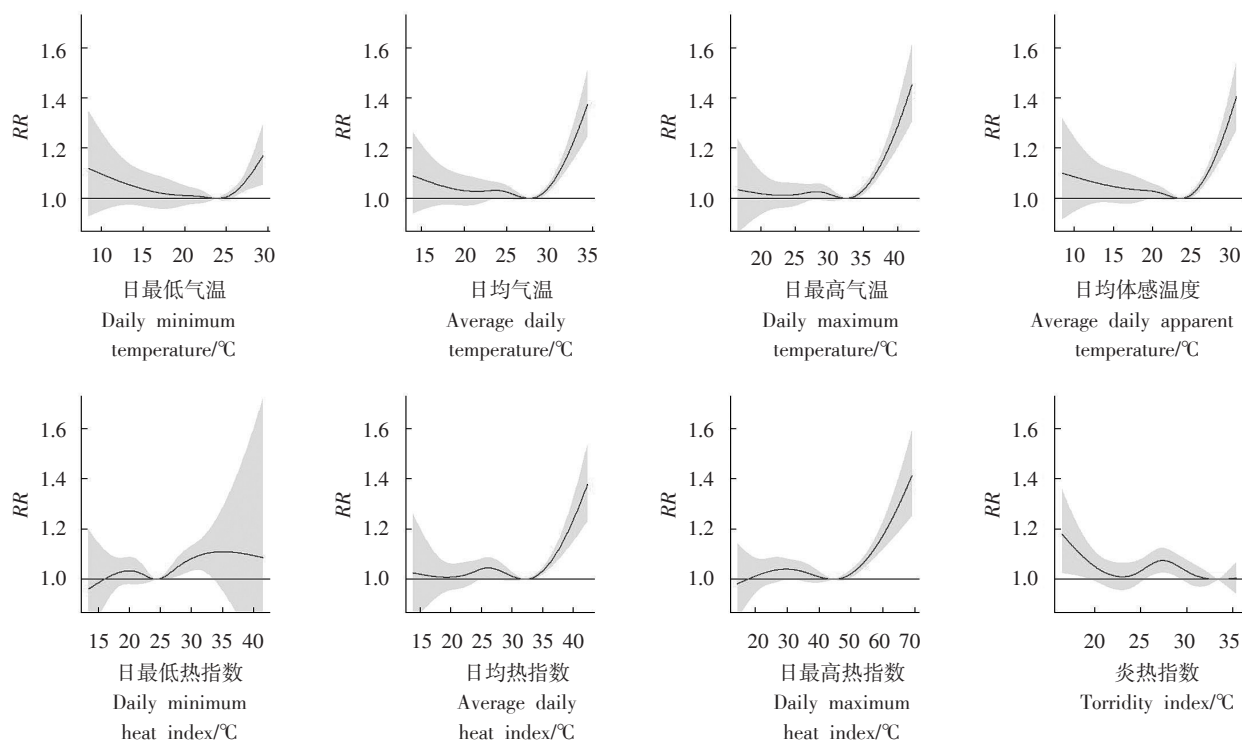


图1 气象指标与总死亡数的暴露-反应关系

Figure 1 The exposure-response relationships between meteorological variables and overall deaths

**2.3 气象指标与YLL率的关系** 除日最低热指数和炎热指数外，其余6项指标与总YLL率的暴露-反应关系均为“J”型，见图2。日均气温与全人群、女性、≥65岁人群、循环系统疾病患者和呼吸系统疾病患者YLL率的模型拟合效果均最优。日均体感温度、日均气温和日最高气温与男性YLL率关系模型的拟合效果均较优。日最高热指数与<65岁人群YLL率关系模型的拟合效果最优，其次为日最低气温和日均气温。日最低热指数和炎热指数

与不同人群组YLL率关系模型的拟合效果均较差，见表3。敏感性分析显示，不同模型中日均气温与总YLL率的拟合效果均最优，结果稳定，见表4。

### 3 讨论

死因监测资料覆盖范围广，持续时间长，数据质量高，常用于高温健康风险预警研究<sup>[3]</sup>。YLL同时考虑死亡数和死亡年龄，比单一死亡数更能准确反映高温对人群健康的影响。本研究分别建立了8项气

表 1 气象指标与死亡数关系模型的 AIC 值

Table 1 The AIC values of the relationship models between meteorological variables and deaths

| 分组 Group                                    | 日最低气温<br>Daily minimum temperature | 日均气温<br>Average daily temperature | 日最高气温<br>Daily maximum temperature | 日均体感温度<br>Average daily apparent temperature | 日最低热指数<br>Daily minimum heat index | 日均热指数<br>Average daily heat index | 日最高热指数<br>Daily maximum heat index | 炎热指数<br>Torridity index |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 全人群 All                                     | 9 379                              | 9 301                             | 9 334                              | 9 318                                        | 9 528                              | 9 377                             | 9 381                              | 9 562                   |
| 男性 Males                                    | 8 468                              | 8 428                             | 8 428                              | 8 425                                        | 8 507                              | 8 453                             | 8 445                              | 8 553                   |
| 女性 Females                                  | 8 072                              | 8 038                             | 8 069                              | 8 059                                        | 8 178                              | 8 081                             | 8 095                              | 8 183                   |
| <65岁人群 People aged <65 years                | 7 194                              | 7 191                             | 7 188                              | 7 192                                        | 7 208                              | 7 191                             | 7 183                              | 7 228                   |
| ≥65岁人群 People aged ≥65 years                | 9 039                              | 8 968                             | 9 007                              | 8 990                                        | 9 190                              | 9 045                             | 9 060                              | 9 204                   |
| 循环系统疾病患者 Patients with circulatory diseases | 7 630                              | 7 595                             | 7 600                              | 7 603                                        | 7 682                              | 7 612                             | 7 613                              | 7 684                   |
| 呼吸系统疾病患者 Patients with respiratory diseases | 6 462                              | 6 444                             | 6 467                              | 6 450                                        | 6 511                              | 6 479                             | 6 485                              | 6 515                   |

表 2 气象指标与总死亡数关系模型的 AIC 值

Table 2 The AIC values of relationship models between meteorological variables and overall deaths

| 模型 Model | 日最低气温<br>Daily minimum temperature | 日均气温<br>Average daily temperature | 日最高气温<br>Daily maximum temperature | 日均体感温度<br>Average daily apparent temperature | 日最低热指数<br>Daily minimum heat index | 日均热指数<br>Average daily heat index | 日最高热指数<br>Daily maximum heat index | 炎热指数<br>Torridity index |
|----------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 0        | 9 379                              | 9 301                             | 9 334                              | 9 318                                        | 9 528                              | 9 377                             | 9 381                              | 9 562                   |
| 1        | 9 384                              | 9 308                             | 9 340                              | 9 324                                        | 9 536                              | 9 380                             | 9 387                              | 9 559                   |
| 2        | 9 370                              | 9 285                             | 9 317                              | 9 305                                        | 9 517                              | 9 353                             | 9 366                              | 9 537                   |
| 3        | 9 376                              | 9 308                             | 9 336                              | 9 320                                        | 9 527                              | 9 377                             | 9 376                              | 9 562                   |
| 4        | 9 376                              | 9 301                             | 9 331                              | 9 312                                        | 9 528                              | 9 380                             | 9 389                              | 9 559                   |
| 5        | 9 518                              | 9 447                             | 9 481                              | 9 466                                        | 9 673                              | 9 517                             | 9 523                              | 9 713                   |
| 6        | 9 169                              | 9 101                             | 9 129                              | 9 116                                        | 9 319                              | 9 174                             | 9 174                              | 9 359                   |

注：模型0为基础模型；模型1加入日均相对湿度；模型2时间变量自由度改为4 a<sup>-1</sup>；模型3气象指标自由度改为3；模型4气象指标自由度改为5；模型5最长滞后时间改为7 d；模型6最长滞后时间改为14 d。Note: Model 0, basic model; Model 1, including relative humidity; Model 2, changing the degree of freedom for the time trend to 4 a<sup>-1</sup>; Model 3, changing the degree of freedom for meteorological variables to 3; Model 4, changing the degree of freedom for meteorological variables to 5; Model 5, changing the maximum lag days to 7 d; Model 6, changing the maximum lag days to 14 d.

象指标与人群死亡数、YLL 率的关系模型，采用 AIC 值评估模型拟合效果，发现日均气温与人群死亡数、YLL 率的关系模型的 AIC 值均较小，更适用于高温健康风险预警。

目前我国采用日最高气温进行高温健康风险预警，但是该指标仅代表一天中最强的热效应，并不能反映夜间气温水平，可能高估气温的健康影响。日均气温综合了白天和夜间的气温效应，与人群健康结局的拟合效果更好，与国内外研究结论类似：曾韦霖

等<sup>[10]</sup>利用广州市数据构建了7项气象指标与人群死亡的关系模型，根据 AIC 和残差平方和最小化原则比较模型拟合效果，发现日均气温和日均体感温度的拟合效果较好；BARNETT 等<sup>[8]</sup>构建了5项气象指标与人群死亡的关系模型，采用交叉验证方法比较模型拟合效果，发现夏季日均气温与不同年龄组死亡的拟合结果均较好。

体感温度、炎热指数等生物气象指数也常被用于高温健康风险预警。高温高湿环境中，含氧量降低，

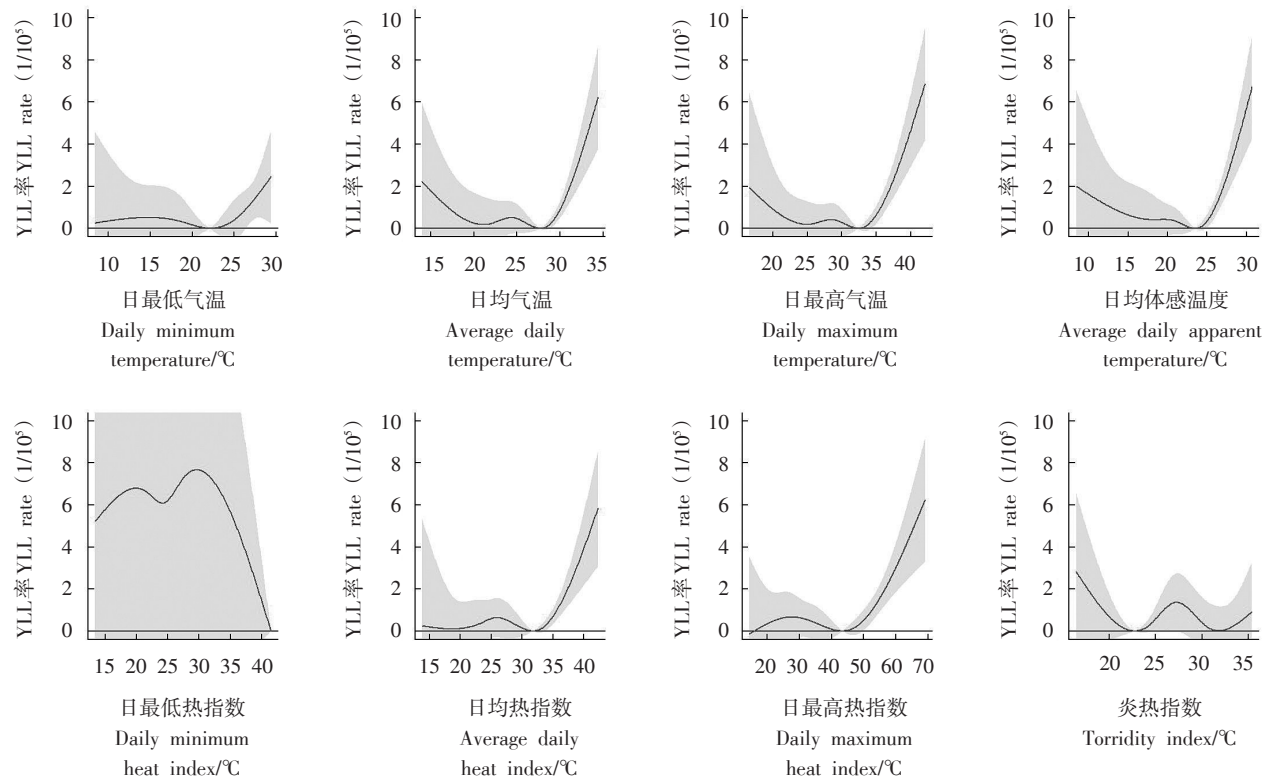


图2 气象指标与总 YLL 率的暴露-反应关系

Figure 2 The exposure-response relationships between meteorological variables and overall YLL rate

表3 气象指标与 YLL 率关系模型的 AIC 值

Table 3 The AIC values of relationship models between meteorological variables and YLL rate

| 分组 Group                                    | 日最低气温<br>Daily minimum temperature | 日均气温<br>Average daily temperature | 日最高气温<br>Daily maximum temperature | 日均体感温度<br>Average daily apparent temperature | 日最低热指数<br>Daily minimum heat index | 日均热指数<br>Average daily heat index | 日最高热指数<br>Daily maximum heat index | 炎热指数<br>Torridity index |
|---------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 全人群 All                                     | 6 048                              | 6 025                             | 6 034                              | 6 031                                        | 6 102                              | 6 045                             | 6 046                              | 6 129                   |
| 男性 Males                                    | 6 979                              | 6 966                             | 6 966                              | 6 966                                        | 7 004                              | 6 974                             | 6 968                              | 7 023                   |
| 女性 Females                                  | 6 547                              | 6 539                             | 6 540                              | 6 542                                        | 6 576                              | 6 540                             | 6 546                              | 6 596                   |
| <65岁人群 People aged <65 years                | 6 016                              | 6 018                             | 6 020                              | 6 019                                        | 6 033                              | 6 019                             | 6 014                              | 6 051                   |
| ≥65岁人群 People aged ≥65 years                | 8 879                              | 8 831                             | 8 859                              | 8 849                                        | 8 969                              | 8 875                             | 8 898                              | 8 977                   |
| 循环系统疾病患者 Patients with circulatory diseases | 3 579                              | 3 565                             | 3 571                              | 3 572                                        | 3 609                              | 3 567                             | 3 575                              | 3 616                   |
| 呼吸系统疾病患者 Patients with respiratory diseases | 1 989                              | 1 981                             | 1 992                              | 1 988                                        | 2 026                              | 2 000                             | 2 000                              | 2 024                   |

人体排汗降温能力下降，易感到闷热烦躁。既往研究根据实验环境中人体舒适度水平创建了一系列生物气象指数，并认为这些指数比单一气温指标更能准确反映高温的健康风险<sup>[19]</sup>。然而近年来流行病学研究发现，舒适度水平与健康风险并不完全等同，低湿度的危害可能比高湿度更大。ARMSTRONG

等<sup>[20]</sup>对全球 445 个城市的数据分析发现，相对湿度每升高 23%，死亡风险下降 1.1%，提示低湿环境中人体舒适度可能比高湿环境中更高，但低湿环境易导致人体脱水或其他健康损害。另一方面，同时使用多种气象指标会增加预报难度，导致预警准确度降低，需进一步开展相关评估。

表 4 气象指标与总 YLL 率关系模型的 AIC 值

Table 4 The AIC values of relationship models between meteorological variables and overall YLL rate

| 模型<br>Model | 日最低气温<br>Daily minimum<br>temperature | 日均气温<br>Average daily<br>temperature | 日最高气温<br>Daily maximum<br>temperature | 日均体感温度<br>Average daily<br>apparent<br>temperature | 日最低热指数<br>Daily minimum<br>heat index | 日均热指数<br>Average daily<br>heat index | 日最高热指数<br>Daily maximum<br>heat index | 炎热指数<br>Torridity<br>index |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 0           | 6 048                                 | 6 025                                | 6 034                                 | 6 031                                              | 6 102                                 | 6 045                                | 6 046                                 | 6 129                      |
| 1           | 6 046                                 | 6 030                                | 6 039                                 | 6 035                                              | 6 108                                 | 6 049                                | 6 049                                 | 6 125                      |
| 2           | 6 044                                 | 6 024                                | 6 036                                 | 6 033                                              | 6 098                                 | 6 039                                | 6 045                                 | 6 123                      |
| 3           | 6 044                                 | 6 024                                | 6 034                                 | 6 027                                              | 6 102                                 | 6 041                                | 6 043                                 | 6 126                      |
| 4           | 6 044                                 | 6 028                                | 6 030                                 | 6 033                                              | 6 101                                 | 6 050                                | 6 049                                 | 6 125                      |
| 5           | 6 128                                 | 6 108                                | 6 122                                 | 6 115                                              | 6 190                                 | 6 131                                | 6 134                                 | 6 221                      |
| 6           | 5 906                                 | 5 890                                | 5 901                                 | 5 896                                              | 5 966                                 | 5 912                                | 5 912                                 | 5 991                      |

注：模型0为基础模型；模型1加入日均相对湿度；模型2时间变量自由度改为4 a<sup>-1</sup>；模型3气象指标自由度改为3；模型4气象指标自由度改为5；模型5最长滞后时间改为7 d；模型6最长滞后时间改为14 d。Note: Model 0, basic model; Model 1, including relative humidity; Model 2, changing the degree of freedom for the time trend to 4 a<sup>-1</sup>; Model 3, changing the degree of freedom for meteorological variables to 3; Model 4, changing the degree of freedom for meteorological variables to 5; Model 5, changing the maximum lag days to 7 d; Model 6, changing the maximum lag days to 14 d.

本研究发现不同性别和年龄人群的最适气象指标并不完全一致，与既往研究结果<sup>[8, 10]</sup>相同，这可能与不同人群的室外活动时间、健康状况和防护措施等存在差异有关。日均气温指标与不同人群死亡数、YLL率拟合效果均较好，适用于高温健康风险预警。此外，本研究未使用发病数据，对高温效应的评估不够充分；仅分析宁波市数据，结果外推存在不确定性。

参考文献

[1] Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymaker [M] // Climate change 2021: the physical science basis. New York: Cambridge University Press, 2021.

[2] CAI W, ZHANG C, SUEN H P, et al. The 2020 China report of the Lancet Countdown on health and climate change [J]. Lancet Public Health, 2021, 6 (1): e64-e81.

[3] CASANUEVA A, BURGSTALL A, KOTLARSKI S, et al. Overview of existing heat-health warning systems in Europe [J/OL]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16 (15) [2022-06-15]. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152657>.

[4] NITSCHKE M, TUCKER G, HANSEN A, et al. Evaluation of a heat warning system in Adelaide, South Australia, using case-series analysis [J/OL]. BMJ Open, 2016, 6 (7) [2022-06-15]. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2016-012125>.

[5] HUANG C, BARNETT A G, XU Z, et al. Managing the health effects of temperature in response to climate change: challenges ahead [J]. Environ Health Perspect, 2013, 121 (4): 415-419.

[6] 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]. J Environ Health, 2015, 32 (11): 1026-1030.

[7] 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): 251-254.

LI M, WU Y L, GUO J L, et al. Correlation between heatstroke and meteorological factors in Shaoxing [J]. Prev Med, 2019, 31 (3): 251-254.

[8] BARNETT A G, TONG S, CLEMENTS A C A. What measure of temperature is the best predictor of mortality? [J]. Environ Res, 2010, 110 (6): 604-611.

[9] METZGER K B, ITO K, MATTE T D. Summer heat and mortality in New York City: how hot is too hot? [J]. Environ Health Perspect, 2010, 118 (1): 80-86.

[10] 曾韦霖, 马文军, 刘涛, 等. 构建气温-死亡关系模型中温度指标的选择 [J]. 中华预防医学杂志, 2012, 46 (6): 946-951.

ZENG W L, MA W J, LIU T, et al. What temperature index is the best predictor for the impact of temperature on mortality [J]. Chin J Prev Med, 2012, 46 (10): 946-951.

[11] ZHANG K, LI Y, SCHWARTZ J D, et al. What weather variables are important in predicting heat-related mortality? A new application of statistical learning methods [J]. Environ Res, 2014, 132, 350-359.

[12] MORABITO M, CRISCI A, MESSERI A, et al. Environmental temperature and thermal indices: what is the most effective predictor of heat-related mortality in different geographical contexts? [J/OL]. Sci World J, 2014 (8) [2022-06-15]. <https://doi.org/10.1155/2014/961750>.

[13] 陈思齐, 俞敏, 周脉耕, 等. 基于体感温度-寿命损失年暴露反应关系确定体感温度的健康风险预警阈值研究 [J]. 中华流行病学杂志, 2021, 42 (8): 1445-1452.

(下转第 815 页)