

· 监测 ·

中国多个城市居民死亡与夏季高温的相关性研究

栾桂杰¹ 殷鹏² 王黎君² 由金玲² 周脉耕³

¹ 山东省疾病预防控制中心免疫预防管理所, 济南 250014; ² 中国疾病预防控制中心慢性非传染性疾病预防控制中心生命登记与死因监测室, 北京 100050; ³ 中国疾病预防控制中心慢性非传染性疾病预防控制中心, 北京 100050

通信作者: 周脉耕, Email:maigengzhou@126.com

【摘要】目的 探讨中国31个城市夏季高温变化与人群死亡之间的关联性。**方法** 收集中国31个城市2008年1月1日至2013年12月31日的每日死亡数据和气象数据。运用分布滞后非线性模型, 控制长期趋势、“星期几效应”等的影响, 分析夏季前期和后期高温变化与死亡的相关性。**结果** 夏季前期高温对死亡影响的RR值高于后期, 夏季前期高温对死亡影响的RR值集中于1.08~2.14, 夏季后期高温对死亡影响的RR值集中于1.03~1.67。夏季前期时, 高温对死亡的影响主要集中在P₅以下和P₉₅以上, 而夏季后期高温对死亡影响主要集中于P₉₅以上。夏季前期高温对死亡的影响可以滞后6 d左右, 而夏季后期高温对死亡的影响只滞后2 d左右。**结论** 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的影响高于夏季后期, 应采取有针对性的防护措施。

【关键词】 高温; 死亡; 夏季; 分布滞后非线性模型

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2019.01.012

Association between high air temperature and mortality in summer: A multi-city analysis in China

Luan Guijie¹, Yin Peng², Wang Lijun², You Jinling², Zhou Maigeng³

¹ Institute for Immunization Management, Shandong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Jinan 250014, China; ² Division of Vital Statistics and Death Surveillance, National Center for Chronic and Non-communicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China; ³ National Center for Chronic and Non-communicable Disease Control and Prevention, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China

Corresponding author: Zhou Maigeng, Email: maigengzhou@126.com

【Abstract】Objective To understand the associations between changes of high air temperature and mortality in summer in 31 cities in China. **Methods** Daily mortality and meteorological data in 31 cities in China from January 1, 2008 to December 31, 2013 were collected. Distributed lag nonlinear model was used to evaluate the association between high air temperature change and mortality in early summer and late summer after controlling for the long-term trend and the effect of “day of week”.

Results The relative risk of high air temperature on mortality was higher in early summer, with relative risk in the range of 1.08–2.14 in early summer and 1.03–1.67 in late summer. In early summer, the influence of high temperature on mortality was mainly below 5th of percentile and above 50th of percentile, while in late summer it was mainly above 95th of percentile. The lag effect of high air temperature on mortality in early summer was 6 days, while the lag effect in late summer was only about 2 days. **Conclusions** Association existed between high air temperature and mortality. The influence of high air temperature on mortality in early summer was stronger than that in late summer. It is necessary to take targeted protection measures.

【Key words】 High temperature; Mortality; Summer; Distributed lag non-linear model

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2019.01.012

随着全球变暖的加剧, 夏季气温呈现明显的增高趋势, 高温热浪等极端气象事件的发生频率增加。气温与死亡之间的暴露反应关系已经得到证

实, 尤其是高温可以明显增加疾病死亡的风险, 目前在全球范围内已经得到大量研究的支持^[1-4]。气温由低到高的变化存在一段持续的过程, 而且季节转

化带来的气温升高会对机体的循环和代谢系统造成明显的影响^[5],目前的研究大多集中于高温或低温对死亡的整体影响^[6-7]。本研究利用我国31个城市的死亡数据和气象数据,采用分布滞后非线性模型(distributed lag non-linear model, DLNM),探究高温与死亡之间的相关性,评估夏季前期和后期不同高温变化过程对死亡的影响,为制定合理的防护措施提供依据。

资料与方法

1. 资料来源:2008年1月1日至2013年12月31日31个城市(北京、长春、长沙、成都、重庆、福州、广州、贵阳、海口、杭州、哈尔滨、合肥、呼和浩特、济南、昆明、兰州、拉萨、南昌、南京、南宁、上海、沈阳、石家庄、太原、天津、乌鲁木齐、武汉、西安、西宁、银川、郑州)的每日死亡数据来源于中国CDC死因监测系统^[8],同期的31个城市的每日气象数据(日平均气温、相对湿度)来源于中国气象科学数据共享网。

2. 研究方法:

(1) 夏季高温月份选择:选取全年中月平均气温最高的4个月,定义为夏季高温期,前两个月定义为夏季前期,后两个月定义为夏季后期。由于我国南北纬度跨度较大,南北高温月份存在差异,夏季高温期在5—8月的有15个城市(北京、长春、哈尔滨、呼和浩特、济南、昆明、兰州、沈阳、石家庄、太原、天津、西安、西宁、银川、郑州),夏季高温期在6—9月的有16个城市(长沙、成都、重庆、福州、广州、贵阳、海口、杭州、合肥、拉萨、南昌、南京、南宁、上海、乌鲁木齐、武汉)。

(2) 模型分析方法:采用目前气温与死亡关联性研究广泛采用的DLNM^[9],在控制相对湿度、长期趋势、星期几效应、假期效应等混杂因素的基础上,将日平均气温以交叉基的形式纳入模型,模型公式:

$$\text{Log}(Y) = \alpha + NS(\text{Time}, df) + NS(\text{Humidity}, df) + \\ Dow + \beta Temp$$

式中: Y 代表每日死亡人数; α 是常数项; NS 是3次样条函数; $Time$ 是表示长期趋势和季节影响的时间变量; df 是自由度; $Humidity$ 是相对湿度; Dow 是星期几效应; $Temp$ 是日平均温度的交叉基(cross basis); β 是 $Temp$ 的系数。拟合模型中的 df 根据赤池信息准则进行最优选择,气温和滞后时间的 df 为4,相对湿度 df 为3,时间变量 df 为7,考虑滞后效应和累积效应,最长滞后时间为10 d。

采用多变量Meta分析计算所有城市的合计值,

用来反映高温对死亡影响的整体暴露反应关系,多变量Meta分析主要用来拟合不同城市之间存在的经济、社会因素等混杂因素的影响,以便得到暴露反应关系的最佳线性无偏预测^[10]。以模型拟合的最小死亡温度作为参考值^[11],分别计算夏季前期和夏季后期高温在 P_{95} 和 P_{99} 对死亡影响的RR值。

3. 统计学分析:运用R3.5.0软件的“dlm”和“mvmeta”程序包进行模型的构建,并通过改变模型中最长滞后天数、长期趋势和相对湿度的自由度等进行敏感性分析。

结 果

1. 基本情况:

(1) 夏季高温期每日死亡数据基本情况:重庆市的日平均死亡人数最多(299.0 ± 173.9)例,拉萨市的日平均死亡人数最少(2.0 ± 1.5)例,有7个城市(北京、成都、重庆、哈尔滨、上海、沈阳、天津)的日平均死亡数超过100例(表1)。

表1 2008—2013年中国31个城市夏季高温期
每日死亡人数($\bar{x} \pm s$)

| 城市 | 月份 | 每日死亡人数 |
|------|-----|-------------------|
| 北京 | 5—8 | 191.7 ± 22.0 |
| 长春 | 5—8 | 60.2 ± 21.4 |
| 长沙 | 6—9 | 82.0 ± 14.0 |
| 成都 | 6—9 | 180.6 ± 21.7 |
| 重庆 | 6—9 | 299.0 ± 173.9 |
| 福州 | 6—9 | 17.0 ± 8.8 |
| 广州 | 6—9 | 85.6 ± 22.0 |
| 贵阳 | 6—9 | 10.0 ± 5.9 |
| 海口 | 6—9 | 5.2 ± 3.2 |
| 杭州 | 6—9 | 23.9 ± 6.0 |
| 哈尔滨 | 5—8 | 160.6 ± 28.4 |
| 合肥 | 6—9 | 56.7 ± 39.1 |
| 呼和浩特 | 5—8 | 16.5 ± 9.3 |
| 济南 | 5—8 | 68.7 ± 30.6 |
| 昆明 | 5—8 | 86.4 ± 13.8 |
| 兰州 | 5—8 | 11.4 ± 9.9 |
| 拉萨 | 6—9 | 2.0 ± 1.5 |
| 南昌 | 6—9 | 21.5 ± 15.7 |
| 南京 | 6—9 | 92.0 ± 13.8 |
| 南宁 | 6—9 | 50.6 ± 14.5 |
| 上海 | 6—9 | 158.0 ± 27.8 |
| 沈阳 | 5—8 | 114.7 ± 22.8 |
| 石家庄 | 5—8 | 65.0 ± 48.6 |
| 太原 | 5—8 | 27.7 ± 7.8 |
| 天津 | 5—8 | 161.8 ± 22.3 |
| 乌鲁木齐 | 6—9 | 15.1 ± 4.6 |
| 武汉 | 6—9 | 29.9 ± 13.2 |
| 西安 | 5—8 | 52.6 ± 17.9 |
| 西宁 | 5—8 | 17.1 ± 5.0 |
| 银川 | 5—8 | 17.6 ± 5.4 |
| 郑州 | 5—8 | 43.8 ± 21.5 |

(2) 气象因素基本情况: 日平均气温由北向南呈现逐渐升高的趋势, 哈尔滨、长春和西宁市的日平均气温在10℃以下; 夏季前期的日平均气温的最低值为14℃(西宁), 最高值为28.9℃(长沙), 夏季后期的日平均气温的最低值为15.4℃(拉萨), 最高值为28.2℃(福州和广州); 北京、长春、哈尔滨、呼和浩特、济南、兰州、沈阳、石家庄、太原、天津、西安、西宁、银川、郑州14个北方城市夏季前期的日平均温度低于夏季后期; 长沙、成都、重庆、贵阳、海口、杭州、合肥、拉萨、南昌、南京、南宁、乌鲁木齐、武汉13个城市夏季前期的日平均温度高于夏季后期; 福州、广州、昆明、上海4个城市夏季前期和夏季后期的日平均气温差异不大(表2)。

表2 2008—2013年中国31个城市夏季气温(℃, $\bar{x} \pm s$)

| 城市 | 夏季前期 | 夏季后期 |
|------|----------|----------|
| 北京 | 23.3±3.2 | 26.9±2.2 |
| 长春 | 18.8±4.2 | 22.9±2.5 |
| 长沙 | 28.9±3.4 | 27.3±4.4 |
| 成都 | 24.5±2.1 | 23.5±3.0 |
| 重庆 | 27.8±3.0 | 27.0±3.9 |
| 福州 | 28.1±2.7 | 28.2±2.1 |
| 广州 | 28.1±1.9 | 28.2±2.0 |
| 贵阳 | 22.1±2.4 | 21.6±3.2 |
| 海口 | 28.3±1.3 | 27.7±1.1 |
| 杭州 | 27.7±3.6 | 27.2±3.6 |
| 哈尔滨 | 19.0±4.9 | 23.1±2.5 |
| 合肥 | 27.4±3.2 | 26.0±3.9 |
| 呼和浩特 | 19.2±4.1 | 22.6±2.9 |
| 济南 | 24.3±4.1 | 26.5±2.8 |
| 昆明 | 20.3±2.3 | 20.5±1.3 |
| 兰州 | 17.6±3.5 | 20.6±2.8 |
| 拉萨 | 17.4±2.4 | 15.4±1.8 |
| 南昌 | 28.4±3.3 | 28.0±3.8 |
| 南京 | 26.9±3.3 | 25.9±3.7 |
| 南宁 | 27.9±1.6 | 27.2±1.9 |
| 上海 | 27.2±3.7 | 27.1±3.2 |
| 沈阳 | 19.7±3.5 | 24.0±2.2 |
| 石家庄 | 24.5±3.7 | 27.2±2.6 |
| 太原 | 21.4±3.5 | 23.8±2.6 |
| 天津 | 23.2±3.2 | 26.7±2.2 |
| 乌鲁木齐 | 23.5±3.2 | 20.4±4.7 |
| 武汉 | 28.0±3.2 | 26.2±4.2 |
| 西安 | 22.4±4.0 | 25.2±2.8 |
| 西宁 | 14.0±3.0 | 17.1±2.5 |
| 银川 | 21.0±3.8 | 23.9±2.6 |
| 郑州 | 25.1±3.8 | 27.6±2.9 |

2. 夏季高温与人群死亡的关联性: 夏季高温与死亡之间的关系呈现先降低, 平稳一段时间后又逐渐升高的趋势, 主要是 P_5 以下和 P_{90} 以上的高温对死亡有影响; 随着滞后天数的增加, 高温对死亡的影响呈现下降的趋势(图1)。夏季前期时, 气温对死亡

的影响主要集中在 P_5 以下, 而夏季后期则相反, 主要集中在 P_{95} 以上; 夏季前期高温对死亡的影响可以滞后6 d左右, 而夏季后期高温对死亡的影响只滞后2 d左右(图2)。

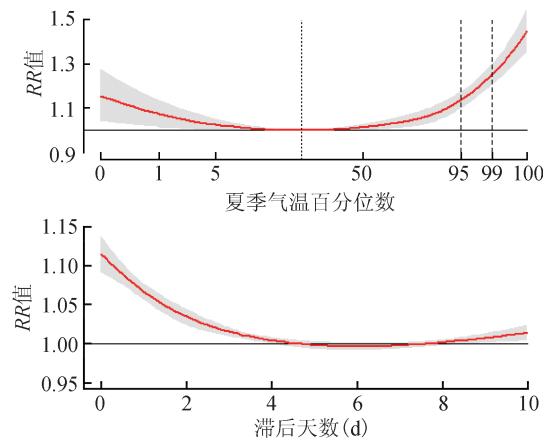


图1 夏季气温对死亡影响的RR值

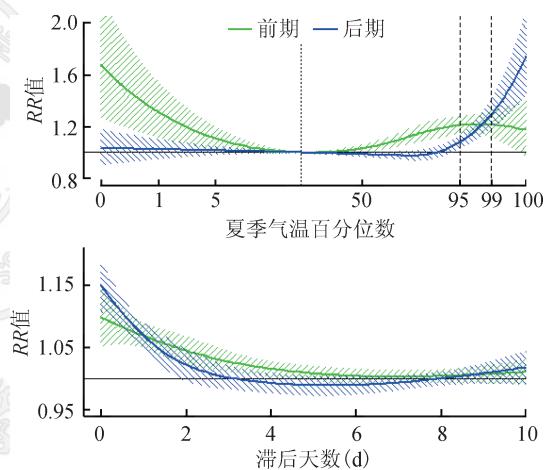


图2 夏季前期和后期气温对死亡影响的RR值

不同城市夏季高温与人群死亡的关联性: 在所有城市中, 均是夏季前期高温对死亡影响的RR值高于夏季后期; 夏季前期时, 不同城市气温 P_{95} 和 P_{99} 对死亡的影响并没有明显的规律性, 但是在夏季后期时, 气温在 P_{99} 对死亡影响的RR值高于 P_{95} (表3)。

3. 模型敏感性分析: 分布滞后非线性模型的残差在0上下对称分布, 并且改变最长滞后时间(14 d, 21 d)、长期趋势(6, 8)和相对湿度的df(4, 5)等参数, 模型的拟合结果无大的波动, 提示模型整体稳定。

讨 论

本研究提供了夏季高温变化与死亡之间关联性的证据, 通过研究可以证实, 夏季前期高温对死亡影响的RR值高于夏季后期, 这与之前Gasparini等^[12]的研究结果一致。夏季后期高温对人体健康造成的

表3 夏季高温对死亡影响的累积RR值

| 城市 | 夏季前期 | | 夏季后期 | |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | P_{95} | P_{99} | P_{95} | P_{99} |
| 北京 | 1.43(1.32~1.54) | 1.41(1.27~1.57) | 1.14(1.06~1.24) | 1.35(1.13~1.61) |
| 长春 | 1.28(1.09~1.50) | 1.20(0.90~1.61) | 1.08(0.83~1.41) | 1.09(0.78~1.04) |
| 长沙 | 1.32(1.05~1.64) | 1.17(0.98~1.42) | 1.15(0.95~1.41) | 1.33(1.06~1.54) |
| 成都 | 1.18(1.03~1.38) | 1.07(0.81~1.43) | 1.11(0.94~1.32) | 1.14(0.82~1.57) |
| 重庆 | 1.46(1.31~1.63) | 2.14(1.71~2.68) | 1.08(1.01~1.17) | 1.15(1.00~1.35) |
| 福州 | 1.84(1.15~3.44) | 1.62(1.38~2.85) | 1.32(1.02~1.59) | 1.34(1.01~1.62) |
| 广州 | 1.31(1.04~1.87) | 1.43(1.27~1.78) | 1.23(1.00~1.53) | 1.31(0.88~2.59) |
| 贵阳 | 1.51(0.80~2.56) | 1.38(0.98~1.54) | 1.07(0.54~2.11) | 1.03(0.73~1.96) |
| 海口 | 1.23(0.69~1.39) | 1.08(0.18~6.43) | 1.16(0.76~2.20) | 1.12(0.75~2.29) |
| 杭州 | 1.87(1.05~2.48) | 1.50(1.33~1.74) | 1.11(0.95~1.29) | 1.65(1.07~2.54) |
| 哈尔滨 | 1.53(1.27~1.98) | 1.58(1.32~1.83) | 1.31(0.75~1.94) | 1.45(1.03~1.87) |
| 合肥 | 1.26(1.05~1.58) | 1.19(0.91~1.41) | 1.18(0.83~1.27) | 1.14(0.94~1.20) |
| 呼和浩特 | 1.73(1.14~2.62) | 1.76(1.08~2.68) | 1.33(0.82~1.18) | 1.25(0.76~2.07) |
| 济南 | 1.52(1.01~2.38) | 1.43(0.97~2.12) | 1.46(0.93~2.29) | 1.41(1.08~1.90) |
| 昆明 | 1.37(0.67~1.75) | 1.28(0.73~1.52) | 1.22(0.79~1.59) | 1.23(0.74~1.64) |
| 兰州 | 1.71(1.26~2.23) | 2.04(1.53~3.24) | 1.44(0.96~1.79) | 1.67(0.87~1.86) |
| 拉萨 | 1.32(0.73~1.68) | 1.40(0.81~1.76) | 1.05(0.78~1.41) | 1.17(0.75~1.91) |
| 南昌 | 1.35(1.04~1.58) | 1.56(1.22~1.72) | 1.34(0.72~2.11) | 1.30(0.89~2.12) |
| 南京 | 1.74(1.55~1.96) | 1.81(1.63~2.33) | 1.29(1.04~1.49) | 1.15(0.95~1.49) |
| 南宁 | 1.22(0.82~1.38) | 1.24(0.77~1.42) | 1.13(0.84~1.27) | 1.14(0.99~1.33) |
| 上海 | 1.37(1.08~1.52) | 1.51(1.25~1.82) | 1.25(1.13~1.67) | 1.35(1.09~1.54) |
| 沈阳 | 1.31(1.18~1.45) | 1.36(1.20~1.52) | 1.27(0.83~1.56) | 1.16(1.01~1.43) |
| 石家庄 | 1.36(1.18~1.61) | 1.47(1.08~1.77) | 1.25(0.78~1.73) | 1.19(0.74~1.45) |
| 太原 | 1.47(1.23~1.79) | 1.61(1.19~1.92) | 1.29(0.94~1.43) | 1.17(0.85~1.45) |
| 天津 | 1.58(1.34~1.79) | 1.62(1.29~1.87) | 1.28(1.15~1.52) | 1.15(0.95~1.35) |
| 乌鲁木齐 | 1.23(0.69~1.45) | 1.28(0.89~1.63) | 1.17(0.83~1.29) | 1.15(0.82~1.34) |
| 武汉 | 1.82(1.18~2.15) | 1.83(1.26~2.19) | 1.54(1.05~1.71) | 1.37(1.02~1.55) |
| 西安 | 1.42(1.13~1.71) | 1.49(1.12~1.65) | 1.37(0.88~1.67) | 1.32(0.85~1.74) |
| 西宁 | 1.23(0.89~1.51) | 1.21(0.82~1.53) | 1.12(0.80~1.35) | 1.08(0.78~1.23) |
| 银川 | 1.18(0.86~1.32) | 1.16(0.87~1.29) | 1.13(0.63~1.65) | 1.12(0.85~1.24) |
| 郑州 | 1.36(1.12~1.47) | 1.29(1.07~1.40) | 1.25(1.00~1.50) | 1.22(0.89~1.48) |

危害较低,这与大多数人的观念存在矛盾,因为人们认为夏季后期的气温要更高,可能增加的死亡风险也会更高,但是对气象资料的分析发现,在31个城市中只有北京、长春等14个北方城市的夏季后期的平均气温高于前期。随着气温的逐渐升高,机体的循环系统和代谢系统会逐渐适应高温的影响^[13],并且高温条件下人们会减少出行和采取空调等降温措施,所以夏季后期高温对死亡的影响并没有前期的影响严重。

研究结果显示,夏季高温对死亡的影响主要发生在滞后4 d之内,这与之前国内外有关研究的结果相一致^[14~17],高温对死亡的影响是即时的,不会滞后太长时间。但是,夏季前期和后期高温对死亡的影响在滞后效应方面存在差异,夏季前期高温的滞后时间在6 d左右,要明显高于夏季后期的2 d,所以夏季前期高温会造成较高的累积RR值,而且夏季后期相对于前期,人们穿着会更轻薄,所以机体的散热会

更快,体感温度和核心温度都会相对较低,对机体造成危害也会降低。夏季暴露于高温环境后,机体会有出汗增多的生理反应,以便降低核心和皮肤温度,使心率和血浆体积膨胀降低,这种调节机制在2周左右可以使机体达到稳定状态^[18]。夏季前期高温刚开始的阶段,机体经历从低温到高温的转变,会造成身体负荷的增加,而且因为刚开始进入高温环境,人们缺少必要的防护和应对措施,所以会造成大剂量的高温暴露,夏季后期时机体已经逐渐适应了高温的环境并且循环和代谢系统恢复正常,这是本研究结果中夏季前期高温对死亡的影响明显高于后期的另一个重要原因。

夏季高温对死亡的影响在总体上主要集中于气温分布的 P_5 以下和 P_{50} 以上,按照时间序列分布来看,它们主要对应的是刚进入夏季的初始阶段和夏季后期的高温阶段。夏季前期和后期高温对死亡的影响还是存在区别的,夏季前期高温对死亡影响的

气温分布与总体影响的分布相同,但是夏季后期高温对死亡的影响主要集中于气温分布的 P_{95} 以上,这就提示我们在进行高温防护时要分时间段有针对性地进行预防,不仅要关注高温极值,同时更要关注季节交替和夏季前后期交替阶段气温的影响^[19]。

如果机体能够在相对短的时间内适应高温环境,无论是通过生理调节还是通过适应性行为,高温及其滞后效应对健康的影响就会比暴露反应关系分析的低。另外,如果我们可以针对高温的不同阶段采取有效的防护措施,例如在前期季节交替的时候适当减少衣物,在高温后期采取有效的降温措施等,就可以有效地降低高温对机体的损害。

综上所述,夏季高温会对人群的健康构成重大威胁,夏季前期高温的影响要高于夏季后期,我们应该因地制宜的制定合理的防护策略,保护人群免受高温的危害。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 刘玲,张金良.气温热浪与居民心脑血管疾病死亡关系的病例交叉研究[J].中华流行病学杂志,2010,31(2):179-184. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2010.02.015.
Liu L, Zhang JL. A case-crossover study between heat waves and daily death from cardiovascular and cerebrovascular disease [J]. Chin J Epidemiol, 2010, 31 (2) : 179-184. DOI: 10.3760/cma.j. issn.0254-6450.2010.02.015.
- [2] 栾桂杰,李涵涵,殷鹏,等.2010年北京市高温热浪对居民死亡的影响[J].环境卫生学杂志,2015,5(6):525-529. DOI: 10.13421/j.cnki.hjwsxzz.2015.06.008.
Luan GJ, Li TT, Yin P, et al. Heat wave impact on mortality in Beijing in 2010 [J]. J Environ Hyg, 2015, 5 (6) : 525-529. DOI: 10.13421/j.cnki.hjwsxzz.2015.06.008.
- [3] Luan GJ, Yin P, Li TT, et al. The years of life lost on cardiovascular disease attributable to ambient temperature in China [J]. Sci Rep, 2017, 7: 13531. DOI: 10.1038/s41598-017-13225-2.
- [4] Yang J, Yin P, Zhou MG, et al. Cardiovascular mortality risk attributable to ambient temperature in China [J]. Heart, 2015, 101 (24): 1966-1972. DOI: 10.1136/heartjnl-2015-308062.
- [5] Zhang XC, Noda S, Himeno R, et al. Cardiovascular disease-induced thermal responses during passive heat stress: an integrated computational study [J]. Int J Numer Method Biomed Eng, 2016, 32(11):e02768. DOI: 10.1002/cnm.2768.
- [6] Wellenius GA, Eliot MN, Bush KF, et al. Heat-related morbidity and mortality in New England: evidence for local policy [J]. Environ Res, 2017, 156: 845-853. DOI: 10.1016/j.envres.2017.02.005.
- [7] Ma WJ, Chen RJ, Kan HD. Temperature-related mortality in 17 large Chinese cities: how heat and cold affect mortality in China [J]. Environ Res, 2014, 134: 127-133. DOI: 10.1016/j.envres.2014.07.007.
- [8] Liu SW, Wu XL, Lopez AD, et al. An integrated national mortality surveillance system for death registration and mortality surveillance, China [J]. Bull World Health Organ, 2016, 94(1): 46-57. DOI: 10.2471/BLT.15.153148.
- [9] Gasparini A, Armstrong B, Kenward MG. Distributed lag non-linear models [J]. Stat Med, 2010, 29 (21) : 2224-2234. DOI: 10.1002/sim.3940.
- [10] Gasparini A, Armstrong B, Kenward MG. Multivariate Meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations [J]. Stat Med, 2012, 31 (29) : 3821-3839. DOI: 10.1002/sim.5471.
- [11] Luan GJ, Yin P, Wang LJ, et al. The temperature-mortality relationship: an analysis from 31 Chinese provincial capital cities [J]. Int J Environ Health Res, 2018, 28 (2) : 192-201. DOI: 10.1080/09603123.2018.1453056.
- [12] Gasparini A, Guo YM, Hashizume M, et al. Changes in susceptibility to heat during the summer: a multicountry analysis [J]. Am J Epidemiol, 2016, 183(11) : 1027-1036. DOI: 10.1093/aje/kwv260.
- [13] Liu CQ, Yavar Z, Sun QH. Cardiovascular response to thermoregulatory challenges [J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2015, 309 (11) : H1793-1812. DOI: 10.1152/ajpheart.00199.2015.
- [14] 张云权,宇传华,鲍俊哲.平均气温、寒潮和热浪对湖北省居民脑卒中死亡的影响[J].中华流行病学杂志,2017,38(4):508-513. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.04.019.
Zhang YQ, Yu CH, Bao JZ. Impact of daily mean temperature, cold spells, and heat waves on stroke mortality a multivariable Meta-analysis from 12 counties of Hubei province, China [J]. Chin J Epidemiol, 2017, 38 (4) : 508-513. DOI: 10.3760/cma.j. issn.0254-6450.2017.04.019.
- [15] 栾桂杰,殷鹏,王黎君,等.我国6城市高温对糖尿病死亡影响的观察性研究[J].中华流行病学杂志,2018,39(5):646-650. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.05.020.
Luan GJ, Yin P, Wang LJ, et al. An observational study of high air temperature on diabetes mortality in six cities in China [J]. Chin J Epidemiol, 2018, 39 (5) : 646-650. DOI: 10.3760/cma.j. issn.0254-6450.2018.05.020.
- [16] Gao HL, Lan L, Yang C, et al. The threshold temperature and lag effects on daily excess mortality in Harbin, China: a time series analysis [J]. Int J Occup Environ Med, 2017, 8(2) : 85-95. DOI: 10.15171/ijom.2017.979.
- [17] Gasparini A, Guo YM, Hashizume M, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study [J]. Lancet, 2015, 386 (9991) : 369-375. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.
- [18] Yin Q, Wang JF. A better indicator to measure the effects of meteorological factors on cardiovascular mortality: heat index [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2018, 25 (23) : 22842-22849. DOI: 10.1007/s11356-018-2396-1.
- [19] Yang J, Zhou MG, Ou CQ, et al. Seasonal variations of temperature-related mortality burden from cardiovascular disease and myocardial infarction in China [J]. Environ Pollut, 2017, 224:400-406. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.02.020.

(收稿日期:2018-07-22)

(本文编辑:万玉立)