

泰安市日平均气温对居民死亡数的滞后影响分析*

张 璟¹ 王文军¹ 张春菊²

(¹ 济宁医学院公共卫生学院, 山东 济宁, 272067; ² 泰安市疾病预防控制中心, 山东 泰安, 271000)



张璟,女,副教授,1976年4月出生于山东省邹城市。2001年7月毕业于华北煤炭医学院流行病学与卫生统计学专业,获硕士学位。2014年7月毕业于复旦大学劳动卫生与环境卫生学专业,获博士学位,研究方向为环境流行病学,主要从事气象条件对健康影响研究。2001年7月至今先后于济宁医学院劳动卫生学教研室和环境卫生学教研室从事教学与科研工作。山东省卫生毒理专业委员会委员,上海市安全生产专家库专家,山东省法医毒物鉴定司法鉴定人,济宁医学院司法鉴定中心质量负责人,法医毒物鉴定室授权签字人。先后主持参与山东省自然科学基金委,省科技厅、省卫计委、省教育厅、济宁市科技局、济宁医学院课题20余项,获得各级奖励20余项,在国内外核心期刊发表科研论文60余篇,其中第一作者18篇。

摘要 目的 了解泰安市日平均气温对不同性别、不同年龄居民每日非意外死亡的影响。**方法** 根据泰安市2009年1月1日至2013年12月31日每日居民死亡资料和同期气相指标及大气污染指标,采用分布滞后非线性模型,在控制长期趋势、季节趋势和其他混杂因素后,研究日平均气温与不同性别、不同年龄死亡数之间的关系。**结果** 泰安市日平均气温对不同性别、不同年龄人群死亡效应曲线均为J形,冷效应具有延迟性,在暴露当天出现,3d左右达到最高,持续30d。热效应表现为急性效应,以当天最高,后逐渐降低,在女性及老年人中呈现出明显的收获效应。**结论** 高温和寒冷均是泰安市居民每日死亡的危险因素,存在滞后效应,且低温效应的滞后时间长于高温。

关键词 气温;非意外死亡;分布滞后非线性模型

中图分类号:R122.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9760(2015)12-381-08

Distributed lag effects in the relationship between daily mean temperature and mortality in Taian

ZHANG Jing, WANG Wenjun, ZHANG Chunju

(School of Public Health, Jining Medical University, Jining 272067, China)

Abstract: Objective To study the impact of daily mean temperature on mortality in different genders and different age groups in Taian. **Methods** According to daily mortality, meteorological and air pollution data, we used a distributed lag nonlinear model (DLNM) to assess the effects of daily mean temperature on mortality (non-accidental for male, female, <65 years group and ≥65 years group) adjusting for the secular trend, seasonal trend and other confounders. **Results** A J-shaped relationship was found consistently between daily mean temperature and non-accidental deaths in different genders and different age groups in Taian. Cold effects were delayed, occurred following exposure, reached highest at about 3 days and persisted for 30 days. Hot effects were acute and highest at 1st day and reduced gradually, which were followed by mortality displacement in female and ≥65 years group. **Conclusion** In Taian, cold and hot temperatures increased the risk of mortality with delayed effects. The effects of cold lasted longer than the effects of heat.

Keywords: Temperature; Non-accidental death; Distributed lag nonlinear model

* [基金项目]山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2014HL092)

近年来,环境温度与人群健康的关系一直备受关注。大量流行病学研究结果显示,每日气温与每日死亡率有关^[1-4]。温度-死亡曲线多表现为 U、V 或 J 型^[5-6],不同国家、不同地区曲线形状表现不同,寒带地区或热带地区气温-死亡曲线多表现为 J 型^[7-8];四季分明的温带地区由于冷效应与热效应都比较明显,气温-死亡曲线多呈现 U 型。除了与所处经纬度有关外,温度对死亡的效应还受地区经济状况、人口密度、种族和空调使用情况等因素影响^[9-11],了解不同地区气温对人群死亡影响的作用特点,对预防控制工作的实施具有重要意义。本文选择泰安市作为研究地区,利用历史的逐日数据绘制气温与死亡的关系曲线,了解寒冷与热效应对死亡的作用模式,为制定区域性的适应策略提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 研究地区

泰安市,面积 7761km²,位于山东省中部,是泰山所在地,地处东经 116°02′ 至 117°59′,北纬 35°38′ 至 36°28′ 之间。属于温带大陆型半湿润季风气候,四季分明,寒暑适宜。春季干燥多风,夏季晴和气爽,冬季寒冷少雪。泰安市 2010 年常住人口 556 万人,人口密度 716 人/km²。

1.2 资料来源

1.2.1 居民死亡资料 依据我国死因登记报告信息系统收集 2009 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日泰安市居民每日死亡资料,非意外死亡人数按国际疾病标准编码(International Classification of Diseases 10:A00-R99)进行统计。

1.2.2 大气污染物监测资料 通过中华人民共和国环境保护部政府网站数据中心获取同时期的空气污染指数(air pollution index,API)。

1.2.3 气象参数资料 通过中国气象科学数据共享服务网,获得泰安市同时期气象因素资料,包括逐日日平均气温和日平均相对湿度。

1.3 统计方法

1.3.1 建立时间序列泊松回归模型 因每日死亡人数不仅受到气温影响,而且受到长期时间趋势、季节趋势及星期效应、相对湿度、每日的空气污染指数等混杂因素影响;另外由于每日死亡人数属于小概率事件,其分布近似泊松分布;故可建立时间序列泊松回归模型,其基本形式为:

$$\log[E(Y_t)] = \alpha + NS(\text{time}_t) + \sum_{i=1}^q \nu_i X_{it} + NS(rh_t) + \sum_{j=1}^m \omega_j (\text{strata}_{jt}) + \epsilon$$

Y_t —观察日 t 当天的死亡人数;

$E(Y_t)$ —观察日 t 当天的预期死亡人数;

α —截距;

NS—自然立方样条函数(natural cubic spline, ns);

time_t —观察日 t 对应的时间变量, $df=7/\text{年}$;

X_{it} —对应变量产生线性影响的解释变量观察日 t 当天的数值,空气污染指数等;

ν_i —回归模型中的解释变量系数;

rh_t —观察日 t 对应的日平均相对湿度, $df=3$;

ω_j —哑变量回归系数;

strata_{jt} —对应变量产生影响的分层哑变量,星期哑变量、月份哑变量等处理星期几,月份效应等;

ϵ —残差。

1.3.2 采用分布滞后非线性模型(distributed lag nonlinear model,DLNM)建模

由于每日死亡率不仅与当日气温有关,也可能与之前数日气温暴露有关,故在进行气温与死亡率关系分析时,应该考虑滞后(lag)效应。因此,在基本泊松回归模型基础上,需要添加每日气温指标。

DLNM 是近年来发展的用于气温与健康关系研究的模型,其利用交叉基的思想,添加时间维度(0,1,2,...,l),将滞后(天)和气温统一在一个二维矩阵中,研究气温对死亡的非线性影响及其滞后效应。为了能够充分观察到温度的滞后效应,参考相关文献^[12],将最大滞后设定为 30d。气温和滞后的 df 分别为 4 和 5。模型公式为:

$$\log[E(Y_t)] = \alpha + \beta T_{t,l} + \sum_{i=1}^q \nu_i X_{it} + NS(\text{time}_t) + NS(rh_t) + \sum_{j=1}^m \omega_j (\text{strata}_{jt})$$

$T_{t,l}$ —由 DLNM 得到的滞后 1d 的温度矩阵;

β — $T_{t,l}$ 温度矩阵的回归系数;

l —滞后天数,最大滞后 30d。

1.4 统计学方法

采用 R2.13.1 软件完成所有资料的描述性分析。利用 DLNM 软件包对死亡数据和气象数据建立交叉矩阵,所有检验均采用双侧检验,以 $P < 0.05$ 为有统计学意义。

2 结果

2.1 资料统计描述

2009 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日, 观察日数为 1827 d, 泰安市日平均非意外死亡人数为 80 人, 其中男性 46 人, 占 57.50%, 女性 34 人, 占 42.50%。 ≥ 65 岁的老年人在每日非意外死亡中所占的比例最大, 为 68.75%。气温和相对湿度的日均值分别为 15.0℃ 和 64%。同期空气污染指数的 P_{50} 为 72.0。见表 1。

表 1 2009—2013 年泰安市居民每日死亡数、气象指标以及空气污染指数分布

观察指标	天数	min	P_{25}	P_{50}	P_{75}	max
每日非意外死亡数据						
男性	1827	1	34	46	58	120
女性	1827	0	23	34	43	94
< 65 岁	1827	0	18	25	31	57
≥ 65 岁	1827	1	38	55	71	146
每日气象指标						
日平均气温/℃	1827	-10.6	3.9	15.0	23.4	32.0
相对湿度/%	1827	13	49	64	76	98
每日空气污染指标						
API	1803	20.0	59.0	72.0	90.0	360.0

注: P_{25} 、 P_{50} 、 P_{75} 分别为第 25、50、75 位百分位数; min 为最小值, max 为最大值。

2.2 泰安市非意外死亡的季节分布

研究显示, 泰安市不同性别、不同年龄人群每

日非意外死亡数分布表现出季节趋势, 冬季最高(1~2 月), 夏季最低(7~8 月)。 ≥ 65 岁老年人中季节趋势表现较 < 65 岁人群明显。季节分布详见图 1。

2.3 DLNM 拟合

2.3.1 不同滞后时间日平均气温对日非意外死亡数的影响 将 2009 年至 2013 年日平均气温与每日不同性别、不同年龄非意外死亡数进行 DLNM 建模拟合, 最大滞后时间设定为 30 d, 观察每一个滞后日对每日居民非意外死亡数的影响, 得到不同滞后气温效应的三维图(图 2)。由图 2 可见, 高温和低温均会引起死亡效应增强, 高温对每日居民非意外死亡的影响主要是短期即时效应, 以死亡当天效应最强, 低温对死亡的效应在滞后 3 d 左右最强, 随着滞后时间的延长, 高温和低温效应均逐渐降低。气温对死亡作用强度在不同性别、不同年龄人群中表现不同。

2.3.2 滞后 30 d 日平均气温对日非意外死亡数的总效应 由图 3 可见 2009 年至 2013 年泰安市日平均气温对死亡效应曲线为 J 形, 低温冷效应持续时间较长, 高温热效应持续时间较短。男性、女性、 < 65 岁人群、 ≥ 65 岁人群对冷热效应的气温拐点分别为 22℃、23℃、22℃、24℃。

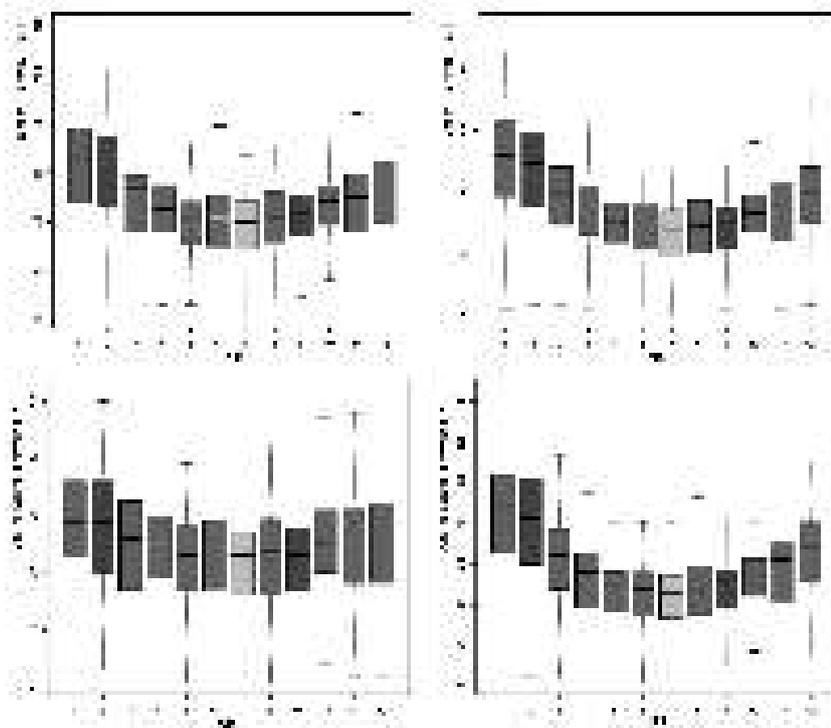


图 1 泰安市 2009—2012 年每日非意外死亡的季节分布

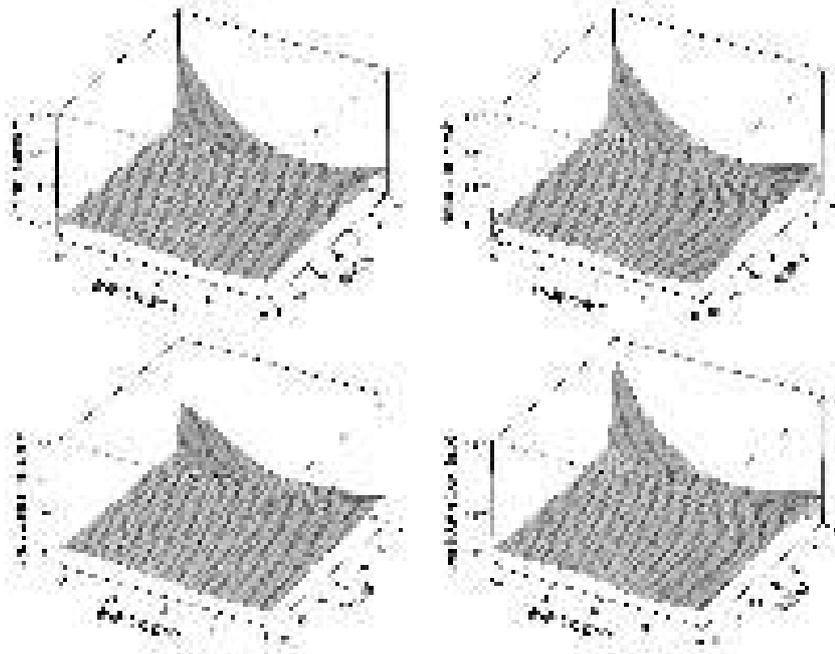
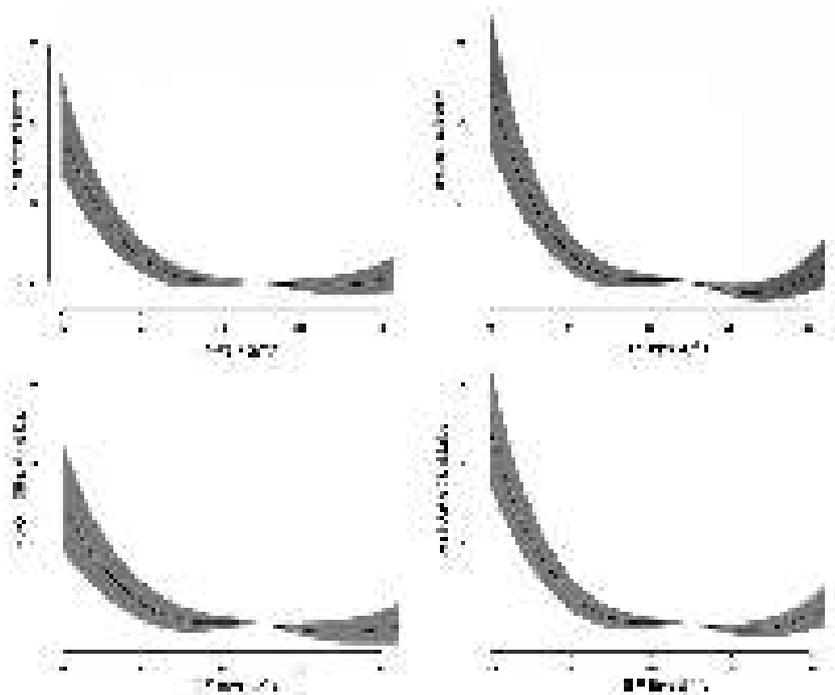


图2 不同滞后天日平均气温对日死亡数影响的三维图

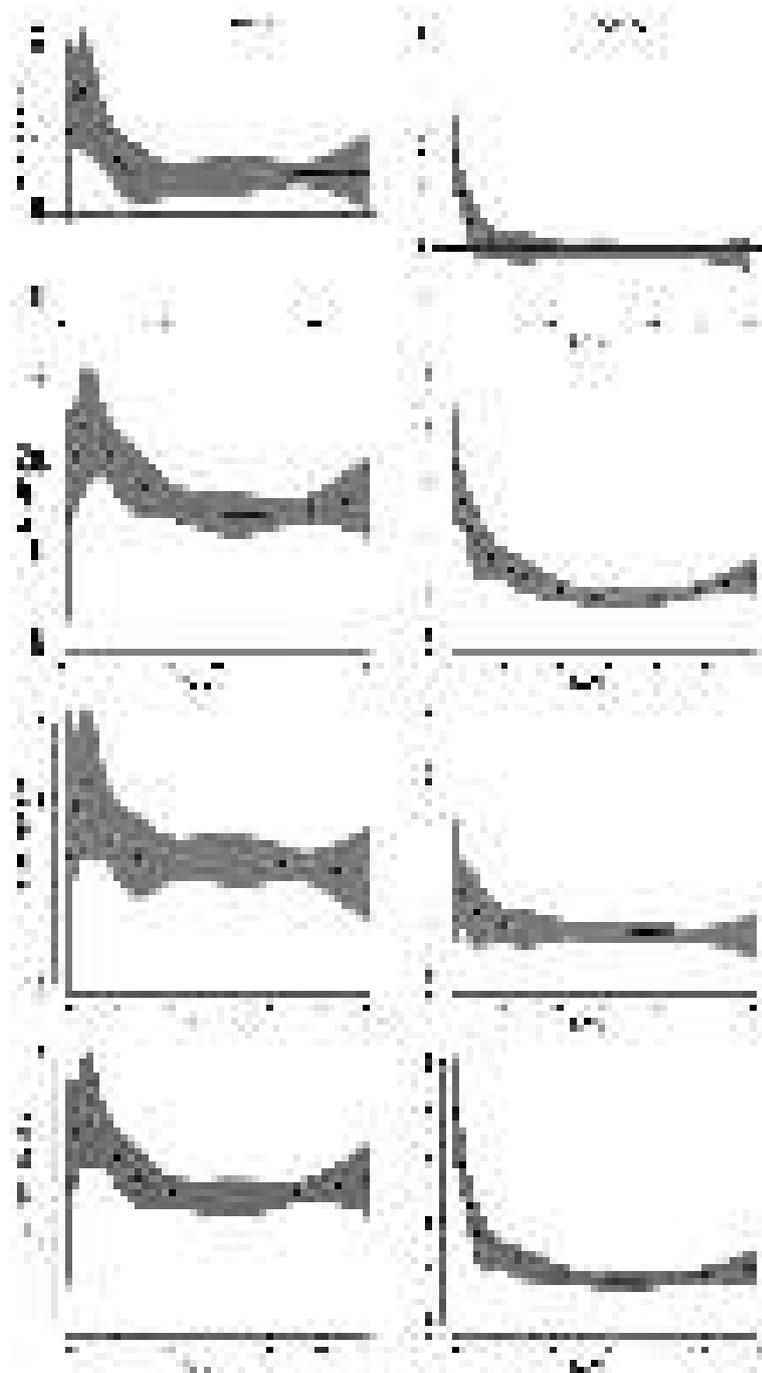


注:黑线为相对危险度均值,阴影为相对危险度95%CI

图3 滞后30d日平均气温对日死亡数的总效应

2.3.3 -4℃和28℃不同滞后对死亡的效应 以泰安市2009年至2013年日平均气温的 P_5 (-4℃)和 P_{95} (28℃)作为低温效应和高温效应的温度节点,绘制30d滞后曲线图。由图可见低温对不同性别,不同年龄死亡的效应在当天即开始出现,

约2~3d达到最高,后开始下降。高温对死亡的效应以当天最高,后开始下降,在女性及 ≥ 65 岁人群中具有明显的收获效应。高温当天对 ≥ 65 岁人群作用强度最大。详见图4。



注:黑线为相对危险度均值,阴影为相对危险度 95%CI

图 4 -4℃时温度每降低 1℃和 28℃温度每增加 1℃不同滞后对死亡的效应

2.3.4 不同滞后寒冷、高温对不同性别、不同年龄人群的累积效应 根据 DLNM 得到不同滞后寒冷、高温对男性、女性、<65 岁人群和 ≥65 岁人群死亡的累积效应。低温的滞后效应以 0~30 d 最强,分别为气温每降低 1℃男性和女性死亡数分别增加 9.05%和 10.87%;<65 岁人群和 ≥65 岁人

群死亡数分别增加 7.78%和 10.57%;女性和 ≥65 岁老年人对寒冷更为敏感。高温的滞后效应在男性、<65 岁人群和 ≥65 岁人群中以 0~2 d 最强,分别为温度每升高 1℃死亡数增加 4.30%、2.63%和 6.47%。女性死亡在 0~30 d 滞后最大,温度每升高 1℃死亡数增加 7.17%。见表 2。

表2 不同滞后寒冷、高温对不同性别、不同年龄人群死亡的累积效应

效应	滞后(d)	温度每升高或降低1℃死亡增加百分数(%,95%CI)			
		男性	女性	<65岁	≥65岁
冷效应	0~2	3.09(2.33,3.87)*	3.10(2.24,3.96)*	2.71(1.75,3.68)*	3.21(2.46,3.97)*
	0~18	6.89(5.71,8.08)*	7.75(6.42,9.09)*	6.11(4.61,7.63)*	7.63(6.47,8.79)*
	0~30	9.05(7.49,10.63)*	10.87(9.11,12.66)*	7.78(5.81,9.79)*	10.57(9.04,12.12)*
热效应	0~2	4.30(3.05,5.56)*	6.46(5.02,7.93)*	2.63(1.18,4.10)*	6.47(5.18,7.79)*
	0~18	3.52(1.80,5.26)*	5.90(3.90,7.94)*	2.18(0.13,4.28)*	5.64(3.88,7.44)*
	0~30	3.39(1.21,5.61)*	7.17(4.59,9.80)*	2.26(-0.37,4.96)	6.27(4.02,8.56)*

注: * P<0.05。

3 讨论

近年来,气温与健康的关系成为国内外研究的热点,时间序列回归模型是研究其关系最常用的方法。在建立模型进行温度与死亡之间关系的研究时,常常需要考虑几个因素,包括温度-死亡曲线的形状、滞后时间和温度指标的选择等。由于温度与死亡是非线性关系,同时还要考虑长达数天至数周的滞后,如何完全地捕捉这种非线性关系,是在模型建立前需要首先解决的问题。近年来,国内外学者多采用分布滞后模型(distributed lag model, DLM)对气温的不同滞后效应进行分析,这一方法的主要优点是在分析气温-死亡关系的模型中引入滞后时间,可以捕捉滞后效应和收获效应。但由于DLM在分析中往往将热效应和寒冷效应均假设为线性,而气温-死亡效应曲线并不是简单的线性关系,同时由于连续数天的气温之间存在很强的自相关性,使DLM往往不能准确描述不同滞后气温对死亡的作用^[12]。DLNM是新发展的一种可以将气温的非线性作用和滞后联合在一起的模型,以三维图形灵活、直观反映不同滞后气温对死亡的作用^[13]。

3.1 气温对死亡的影响

本文采用DLNM模型发现,泰安市日平均气温-死亡曲线呈J形,显示低温和高温均与超额死亡密切相关。每日男性、女性、<65岁人群和≥65岁人群死亡风险最低点的日平均气温温度点分别为22℃、23℃、22℃、24℃,且低温效应较高温效应作用时间长。国内有研究显示天津地区日均气温-死亡曲线呈U形^[6],广州地区气温-死亡曲线呈V、U形^[14],上述研究结果与气温对死亡的影响在不同城市表现并不相同,具有区域特异性的观点一致^[5]。气温对死亡的作用模式随着维度改变而不

同^[15],还与地区社会经济发展状况^[16]、人口老龄化程度^[4]、空气污染水平^[17-18]、卫生服务可及程度^[19]等因素有关。应结合研究地区的实际情况,提出有效的防控策略。

3.2 气温滞后效应对死亡的影响

在气温对死亡作用的研究中,确定温度暴露与出现死亡之间作用的滞后期,以及暴露后出现死亡效应的持续时间较为重要。高温的效应滞后时间常常较短,1995年芝加哥热浪所致的死亡高峰出现在气温高峰后的2d^[20]。而冷效应的滞后时间常常较长^[21],不同国家、地区冷效应的滞后时间多表现不同,Anderson和Bell对美国107个社区温度-死亡关系的研究中将滞后时间设定为28d^[22],Armstrong对伦敦温度-死亡关系的研究亦将滞后设定为28d^[23],而Pattenden在对索菲亚和伦敦的研究中,将寒冷滞后时间均设定为14d^[24],相同的城市采用不同的滞后时间,得到的温度效应不同。在我国不同城市的温度对非意外死亡的研究中,不同研究者对冷热效应的滞后设定亦不同,Chan等对香港的研究中,将冷、热效应滞后均设定为7d^[16];Wu等将广州、珠海、长沙、昆明5个城市的冷效应滞后设定为27d,热效应滞后设定为3d^[25];裴德升和李丽萍在对重庆、北京、哈尔滨、福州、汕头5个城市的研究^[26]和Qian等武汉的研究^[27]中,冷、热效应滞后均设定为0d;Guo等对天津的温度效应研究,将冷效应滞后设定为18d,热效应设定为2d^[6]。Kim等^[28]的研究指出,滞后约30d其累积效应更具“地区代表性”。总之,不同地区观测到的气温对死亡影响所呈现出冷、热效应有很大差异。近年来大量国内外的研究提示,为防止冷效应被低估,应采用较长的滞后时间进行分析,而热效应的研究则应采用较短的滞后时间^[22]。

本文将气温对死亡效应的滞后分析时间延长

为 0~30 d,发现热效应表现为持续时间较短的急性效应,在暴露当天最高,在女性人群和≥65 岁老年人中存在明显的“收获效应”,这表明,高温暴露在较短的时间内增加了敏感人群的死亡风险,常被认为是短时间内加速了脆弱人群的死亡。当人体温度与环境温度不同时,需要同环境进行热交换,使中心体温在 37℃ 保持平衡;在高温条件下,主要依靠汗液蒸发散发热量维持体温平衡,高温对机体的损害作用主要是由于大量汗液丢失导致的脱水,电解质平衡紊乱,血液黏稠度增加,外周血管扩张,血压下降引起^[29];同时,高温环境中人的心血管系统常处于紧张状态,也可以使血压发生变化。

低温导致的超额死亡往往从暴露当天开始升高,3 d 左右达到最高后开始下降,持续时间较长。许多研究采用 0~7 d 作为滞后分析时间,易低估低温的效应。寒冷对人体的影响主要是由于体温增加血小板、红细胞数量,是血液胆固醇和纤维蛋白原增加,黏稠度增大,外周血管收缩导致血压升高,对心血管系统产生不良影响;寒冷还可以引起冠状动脉痉挛,导致心绞痛发作。一些患有慢性心肺系统疾病的人,对环境温度较敏感,当气温降低时,易复发加重。同时,当外界气温较低时,人们往往减少外出,尽量待在室内,人群在室内的聚集,易造成呼吸系统交叉感染和反复感染的机会,由于其病程较长,以死亡作为观察终点,则需要有较长的滞后期。

3.3 气温对老年人死亡的影响

气温对不同地区、不同人群的健康效应存在着差异,年龄一直被认为是其对健康作用的效应修饰因素^[8,30-31]。国内外大量研究显示,老年人对寒冷和高温更敏感^[32],社会隔离^[33],缺乏社会支持^[34],经济收入低^[35],文化程度低^[11],居住条件差,居住环境中没有空调^[36]等都可以增加老年人对寒冷和高温的脆弱性。老年人由于体温调节能力下降,更易受到周围温度的影响。本文显示温度在-4℃ 每下降 1℃,0~30d 中≥65 岁老年人死亡数增加 10.57%;气温在 28℃ 以上每升高 1℃,0~2d 中≥65 岁老年人死亡数增加 6.47%。面对高温期间温度增加,排汗阈值相对升高,再加上出汗多,导致血液黏稠度升高,这些生理变化使心脑血管和呼吸系统的压力上升,容易由于发生脱水、脑梗死和心肌梗死而死亡^[37]。另外,老年人可能由于服用某些药物,使正常的排汗或其他调节体温的过程受到干扰,从而加剧了上述高温的死亡效应。老人的生活

条件,获得的社会支持程度,其对医疗卫生服务的可及程度都会影响温度对老年人的健康效应。此外,独居老人由于缺乏社会联系和社会支持,在寒冷或高温天气更容易受影响。目前,国内关于温度与死亡关系研究较多集中在全人群或是患病人群,较少针对特有人群(不同年龄、性别)进行研究^[38]。

人口老龄化是我国现在面临的一个社会问题,制定适应措施,降低老年人对寒冷和高温的脆弱性是提高气候变化适应的重要策略。气温骤变时,应根据温度变化对人群健康的影响特点制定相应的预报、检测、和监控网络,减少其导致的健康危害,确保人群的健康。

参考文献:

- [1] 司朝宗,陈晓东,周连,等.南京市某区气温与居民死亡关系的时间序列分析[J].环境与健康杂志,2011,28(3):230-232.
- [2] Guo Y, Barnett A G, Tong T. High temperatures-related elderly mortality varied greatly from year to year: important information for heat-warning systems [J]. Scientific reports, 2012, 2 published on line.
- [3] Lin Y K, Chang C K, Li M H, et al. Wang. High-temperature indices associated with mortality and outpatient visits: characterizing the association with elevated temperature [J]. Science of the Total Environment, 2012, 427: 41-49.
- [4] Basu R, Malig B. High ambient temperature and mortality in California: exploring the roles of age, disease, and mortality displacement [J]. Environ Res, 2011, 111 (8): 1286-1292.
- [5] Curriero F C, Heiner K S, Samet J M, et al. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States [J]. Am J Epidemiol, 2002, 155 (1): 80-87.
- [6] Guo Y, Barnett A G, Pan X, et al. The impact of temperature on mortality in Tianjin, China: a case-crossover design with a distributed lag nonlinear model [J]. Environ Health Perspect, 2011, 119 (12): 1719-1725.
- [7] Hashizume M, Wagatsuma Y, Hayashi T, et al. The effect of temperature on mortality in rural Bangladesh—a population-based time-series study [J]. Int J Epidemiol, 2009, 38 (6): 1689-1697.
- [8] Revich B, Shaposhnikov D. Temperature-induced excess mortality in Moscow, Russia [J]. Int J Biometeorol, 2008, 52 (5): 367-374.
- [9] Medina-Ramon M, Zanobetti A, Cavanagh D P, et al. Extreme temperatures and mortality: assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case-only analysis [J]. Environ Health Perspect, 2006, 114 (9): 1331-1336.
- [10] O'Neill M S, Zanobetti A, Schwartz J. Disparities by race in heat-related mortality in four US cities: the role of air conditioning prevalence [J]. J Urban Health, 2005, 82 (2): 191-

- 197.
- [11] O'Neill M S, Zanobetti A, Schwartz J. Modifiers of the temperature and mortality association in seven us cities[J]. *Am J Epidemiol*, 2003, 157 (12): 1074-1082.
- [12] Ha J, Shin J, Kim H. Distributed lag effects in the relationship between temperature and mortality in three major cities in south korea[J]. *Sci Total Environ*, 2011, 409 (18): 3274-3280.
- [13] Gasparrini A, Armstrong B, Kenward M G. Distributed lag non-linear models[J]. *Stat Med*, 2010, 29 (21): 2224-2234.
- [14] 杨军, 欧春泉, 丁研, 等. 广州市逐日死亡人数与气温关系的时间序列研究[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29 (2): 136-138.
- [15] Hajat S, Kovats R S, Lachowycz K. Heat-related and cold-related deaths in England and Wales; who is at risk[J]? *Occup Environ Med*, 2007, 64 (2): 93-100.
- [16] Chan E Y, Goggins W B, Kim J J, et al. A study of intracity variation of temperature-related mortality and socioeconomic status among the Chinese population in Hong Kong[J]. *J Epidemiol Community Health*, 2012, 66 (4): 322-327.
- [17] Bell M L, Goldberg R, Hogrefe C, et al. Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities[J]. *Climatic Change*, 2007, 82 (1): 61-76.
- [18] Sujaritpong S, Dear K, Cope M, et al. Quantifying the health impacts of air pollution under a changing climate—a review of approaches and methodology[J]. *Int J Biometeorol*, 2013 published online.
- [19] 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; 415-419.
- [20] Whitman S, Good G, Donoghue E R, et al. Mortality in chicao attributed to the July 1995 heat wave[J]. *American Journal of public health*, 1997, 87 (9): 1515-1518.
- [21] Carder M, McNamee R, Beverland I, et al. The lagged effect of cold temperature and wind chill on cardiorespiratory mortality in scotland[J]. *Occup Environ Med*, 2005, 62 (10): 702-710.
- [22] Anderson B G, 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.
- [23] Armstrong B. Models for the relationship between ambient temperature and daily mortality[J]. *Epidemiology*, 2006, 17 (6): 624-631.
- [24] Pattenden S, Nikiforov B, Armstrong B G. Mortality and temperature in Sofia and London [J]. *J Epidemiol Community Health*, 2003, 57 (8): 628-633.
- [25] Wu W, Xiao Y, Li G, et al. Temperature - mortality relationship in four subtropical Chinese cities; a time-series study using a distributed lag non-linear model[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 449: 355-362.
- [26] 裴德升, 李丽萍. 基于人群日死亡数的五城市环境温度阈值分析[J]. *中华疾病控制杂志*, 2011, 15 (5): 372-376.
- [27] Qian Z, He Q, Lin H M, et al. High temperatures enhanced acute mortality effects of ambient particle pollution in the "Oven" city of Wuhan, China[J]. *Environmental health perspectives*, 2008, 116 (9): 1172.
- [28] Kim Y M, Kim S, Cheong H K, et al. Comparison of temperature indexes for the impact assessment of heat stress on heat-related mortality [J]. *Environ Health Toxicol*, 2011, 26: e2011009.
- [29] Bouchama A, Knochel J P. Heat stroke[J]. *N Engl J Med*, 2002, 346 (25): 1978-1988.
- [30] El-Zein A, Tewtel-Salem M, Nehme G. A time-series analysis of mortality and air temperature in greater beirut[J]. *Sci Total Environ*, 2004, 330 (1-3): 71-80.
- [31] Rocklöv J, Forsberg B. The effect of temperature on mortality in stockholm 1998-2003; a study of lag structures and heat-wave effects[J]. *Scand J Public Health*, 2008, 36 (5): 516-523.
- [32] Basu R, Ostro B D. A multicounty analysis identifying the populations vulnerable to mortality associated with high ambient temperature in california[J]. *American journal of epidemiology*, 2008, 168 (6): 632-637.
- [33] Naughton M P, Henderson A, Mirabelli M C, et al. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in chicao[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2002, 22 (4): 221-227.
- [34] Semenza J C, Rubin C H, Falter K H, et al. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in chicao[J]. *New England Journal of Medicine*, 1996, 335 (2): 84-90.
- [35] Kaiser R, Rubin C H, Henderson A K, et al. Heat-related death and mental illness during the 1999 cincinnati heat wave [J]. *The American journal of forensic medicine and pathology*, 2001, 22 (3): 303-307.
- [36] Vandentorren S, Bretin P, Zeghnoun A, et al. August 2003 heat wave in france: risk factors for death of elderly people living at home[J]. *The European Journal of Public Health*, 2006, 16 (6): 583-591.
- [37] Parsons K. Maintaining health, comfort and productivity in heat Waves [J]. *Global Health Action*, 2009 11 Nov published on line.
- [38] Frumkin H, Fried L, Moody R. Aging, climate change, and legacy thinking[J]. *Am J Public Health*, 2012, 102 (8): 1434-1438.

(收稿日期 2015-11-15)