

用不同指标度量隔日气温变异对居民寿命损失年影响的比较研究

陈思齐^a, 许燕君^b, 胡建雄^a, 许晓君^b, 刘涛^a, 肖建鹏^a, 曾韦霖^a, 郭凌川^a, 李杏^a, 马文军^a

广东省疾病预防控制中心 a. 广东省公共卫生研究院 b. 慢性非传染性疾病预防控制所, 广东 广州 511430

摘要:

[背景] 大量研究表明气温是影响人群健康的重要因素, 而气温变异, 尤其隔日气温变异对人群健康影响的研究较少。

[目的] 比较隔日温差 (*TCN*, 隔日平均气温之差)、气温变异 (*TV*, 隔日最高气温和最低气温的标准差) 以及本研究新提出的根据隔日气温变异的方向和效应大小计算得到的隔日温度总变异 (*TTV*) 这三个隔日气温变异指标与居民寿命损失年 (*YLL*) 的暴露-反应关系, 探索能更好反映隔日气温变异对居民死亡影响的指标。

[方法] 收集 2013—2017 年广东省 40 个区 (县) 气象数据以及死亡登记资料。采用分布滞后非线性模型 (DLNM) 和多变量 meta 分析的两阶段分析方法, 分别拟合日夜温差和夜日温差与 *YLL* 率 (每 10 万人口 *YLL* 值) 的暴露-反应关系, 提取日夜温差和夜日温差的归因 *YLL* 率作为各自权重计算 *TTV*。计算 Pearson 相关系数, 分析三个隔日气象变异指标间的相关性。采用 DLNM 和多变量 meta 分析两阶段分析方法, 分别分析 *TCN*、*TV* 和 *TTV* 与居民 *YLL* 率的暴露-反应关系, 比较不同隔日气温变异指标对人群死亡影响的差异。

[结果] 研究期间内广东省 40 个区 (县) 日均 *YLL* 率为 22.3/10 万。经计算, *TCN* 平均值为 (0.0±1.8) °C, *TV* 为 4.6±1.5, *TTV* 平均值为 (8.1±2.7) °C, 三个指标均趋近正态分布。*TCN* 与 *TV* 和 *TTV* 相关性较弱 ($r=0.0979$, $r=0.0880$), 而 *TV* 与 *TTV* 相关性较强 ($r=0.8891$)。在控制平均气温的滞后效应后, *TCN* 与 *YLL* 率的暴露-反应关系无统计学意义, 而 *TV* 和 *TTV* 与 *YLL* 率的暴露-反应关系有统计学意义。*TV*-*YLL* 和 *TTV*-*YLL* 的暴露-反应关系曲线相似, 均呈类似“U”型关系, 过低或过高的 *TV* 和 *TTV* 均会增加人群的 *YLL* 率。极端低 (第 5 百分位数) 的 *TV* ($TV=2.2$) 和 *TTV* ($TTV=2.8$ °C) 的归因 *YLL* 率及其 95% *CI* 依次为 1.0/10 万 (0.1/10 万~1.9/10 万) 和 2.1/10 万 (0.2/10 万~4.0/10 万), 极端高 (第 95 百分位数) 的 *TV* ($TV=7.2$) 和 *TTV* ($TTV=12.1$ °C) 的归因 *YLL* 率效应值及其 95% *CI* 依次为 3.1/10 万 (1.2/10 万~5.1/10 万) 和 4.1/10 万 (2.3/10 万~5.8/10 万), 在极端低和极端高节点上, *TTV* 的 *YLL* 率效应值均大于 *TV*, 而在中等低和中等高节点上, 两个指标的效应相近。

[结论] *TCN*、*TV*、*TTV* 与 *YLL* 的暴露-反应关系存在差异, 其中 *TTV* 综合考虑了气温变异的程度、方向以及健康效应, 更加全面地反映了短时气温变异对人群健康的影响。

关键词: 温度变异; 隔日温差; 夜日温差; 日夜温差; 寿命损失年; 分布滞后非线性模型

Comparison of indicators in predicting impact of temperature variability between neighboring days on years of life lost CHEN Si-qi^a, XU Yan-jun^b, HU Jian-xiong^a, XU Xiao-jun^b, LIU Tao^a, XIAO Jian-peng^a, ZENG Wei-lin^a, GUO Ling-chuan^a, LI Xing^a, MA Wen-jun^a (a. Guangdong Provincial Institute of Public Health b. Institute of Chronic and Noncommunicable Disease Control and Prevention, Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou, Guangdong 511430, China)

Abstract:

[Background] Numerous epidemiological studies have demonstrated a significant association between ambient temperature and population health, but evidence is limited for the health impact of temperature variability between neighboring days.

[Objective] The study compares exposure-response associations of years of life lost (*YLL*) with different indicators of temperature variability between neighboring days, including temperature change between neighboring days (*TCN*, difference of mean temperature between neighboring

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20079

组稿专家

马文军 (广东省疾病预防控制中心广东省公共卫生研究院), E-mail: mawj@gdiph.org.cn

基金项目

国家重点研发计划 (2018YFA0606200)

作者简介

并列第一作者。
陈思齐 (1995—), 女, 硕士;
E-mail: sisi3338@126.com
许燕君 (1975—), 女, 硕士, 主任医师;
E-mail: 759888406@qq.com

通信作者

马文军, E-mail: mawj@gdiph.org.cn

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-03-01

录用日期 2020-04-22

文章编号 2095-9982(2020)07-0636-07

中图分类号 R12

文献标志码 A

►引用

陈思齐, 许燕君, 胡建雄, 等. 用不同指标度量隔日气温变异对居民寿命损失年影响的比较研究 [J]. 环境与职业医学, 2020, 37 (7): 636-642.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20079

Funding

This study was funded.

Correspondence to

MA Wen-jun, E-mail: mawj@gdiph.org.cn

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2020-03-01

Accepted 2020-04-22

►To cite

CHEN Si-qi, XU Yan-jun, HU Jian-xiong, et al. Comparison of indicators in predicting impact of temperature variability between neighboring days on years of life lost [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(7): 636-642.

►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20079

days), temperature variability (TV, the standard deviation of maximum and minimum temperatures between neighboring days), and total temperature variability between neighboring days (TTV) according to the directions and effects of temperature variability between neighboring days which was developed in the present study. The study aims to explore which measure can better assess the impact of temperature variability between neighboring days on mortality.

[Methods] Death registration data and meteorological data during 2013–2017 were collected from 40 districts/counties in Guangdong, China. The exposure-response association of diurnal temperature range with YLL rate (YLL per 100 000 population) and the association of nocturnal temperature range with YLL rate were investigated using a two-stage approach including distributed lag non-linear model (DLNM) and multivariable meta-analysis. Then TTV was weighted by attributable YLL rate of diurnal temperature range and nocturnal temperature range. The correlations of the three indicators of temperature variability between neighboring days were examined by Pearson correlation analysis. The exposure-response associations of YLL rate with TCN, TV, and TTV were evaluated by DLNM model and multivariable meta-analysis. The effects of different indicators of temperature variability between neighboring days on mortality were compared.

[Results] The daily average YLL rate of the 40 study locations in Guangdong Province was 22.3 per 10^5 inhabitants during the study period. The means of TCN, TV, and TTV were $(0.0 \pm 1.8)^\circ\text{C}$, 4.6 ± 1.5 , and $(8.1 \pm 2.7)^\circ\text{C}$, respectively. These indicators all approximated a normal distribution. TCN had a weak correlation with TV and TTV ($r=0.0979$, $r=0.0880$), and TV had a strong correlation with TTV ($r=0.8891$). The exposure-response association between TV and YLL rate was insignificant after controlling the overall lag effect of temperature, but TV and TTV were statistically associated with YLL rate. Both the TV-YLL and the TTV-YLL exposure-response relationships were U-shaped, suggesting that both ends of TV and TTV increased YLL rate in the study population. The attributable YLL rates of extremely low TV ($P_{\text{TV}}=2.2$) and extremely high TV ($P_{\text{TV}}=7.2$) were $1.0/10^5$ (95% CI: $0.1/10^5$ – $1.9/10^5$) and $3.1/10^5$ (95% CI: $1.2/10^5$ – $5.1/10^5$) respectively, and both were lower than the attributable YLL rates of extremely low TTV ($P_{\text{TTV}}=2.1^\circ\text{C}$) ($2.1/10^5$, 95% CI: $0.2/10^5$ – $4.0/10^5$) and extremely high TTV ($P_{\text{TTV}}=12.1^\circ\text{C}$) ($4.1/10^5$, 95% CI: $2.3/10^5$ – $5.8/10^5$). The effects of moderately low or high TV and TTV were similar.

[Conclusion] Associations of YLL with TCN, TV, and TTV are inconsistent. TTV takes both degree and direction of temperature variability into account, and is a better predictor of the impact of temperature variability between neighboring days on human health.

Keywords: temperature variability; temperature change between neighboring days; nocturnal temperature range; diurnal temperature range; years of life lost; distributed lag non-linear model

在全球气候变化的背景下,国内外大量流行病学研究关注环境非适宜温度(高温和低温)、极端气温事件与人群健康的关系^[1-4]。研究发现环境温度与死亡风险之间存在“U”或“V”型曲线关系^[5-7],热浪、寒潮等极端气温事件大大增加了人群的死亡风险^[8-9]。近年来,部分研究也开始关注短时间气温变异与人群健康的关系。短时气温变异可分为日内变异与隔日变异,日内气温变异与人群健康的研究较多,常用的指标为日夜温差(diurnal temperature range, DTR; 日最高气温与日最低气温之差)。研究表明,高DTR明显增加人群死亡风险^[10-11]。对于隔日气温变异,既往大部分研究以隔日温差(temperature change between neighboring days, TCN; 日平均气温与前一日平均气温之差)为指标,发现不同方向的温度变异对人群健康的影响不一致^[12-14],但该指标仅考虑日间平均温度之差,掩盖了日夜间气温高低的变化,可能无法真实地反映隔日的气温变异。也有研究提出利用气温变异(temperature variability, TV; 两日的每日最高气温与最低气温的标准差,该指标单位为1)评价短时的气温变异情况,但该指标忽略了隔日气温变异的方向^[15]。例如,昨天最高和最低气温是30、25℃,今天最高和最低气温为34、28℃,明天最高和最低气温是32、29℃,

今明两天(48h)气温变异经历了一个气温上升(9℃)、下降(6℃)、上升(4℃)、下降(3℃)过程,而且气温上升和下降过程导致的健康效应可能有所不同。另外,目前关注气温与人体健康的研究多以死亡数作为健康结局指标。死亡数这一指标仅仅考虑了死亡的数量,而气温变异往往对老年人死亡的影响更大,因此采用死亡数作为结局变量会高估隔日温度变异的公共卫生学意义。寿命损失年(years of life lost, YLL)则同时考虑了死亡数以及不同年龄死亡的权重,能更准确地反映健康风险因素对人群健康的影响^[16-17]。

基于此,本研究创新性地提出一个同时考虑气温变异大小、方向以及健康效应的指标——隔日气温总变异(total temperature variability between neighboring days, TTV),利用广东省40个区(县)人口、死亡和气象数据,分析TTV与人群YLL的关系,并与既往常用的TCN和TV进行比较,探索各指标差异以及气温变异对人群死亡的影响。

1 材料与方法

1.1 数据来源

从广东省疾病预防控制中心获取广东省40个县(区)2013年1月1日—2017年12月31日全人群的每

日死因登记资料,包括死因、死亡日期、年龄、性别等信息。根据第10版国际疾病分类标识(International Classification of Disease 10th Revision, ICD-10)对死因分类,非意外死亡编码为A00~R99。本研究已经过广东省疾病预防控制中心伦理委员会的审查评估,伦理审批号为2019025。

从中国气象科学数据共享服务平台获取全国698个气象站点2012—2017年每日气象资料,包括日平均温度、日最高温、日最低温、相对湿度等数据(<http://data.cma.cn/>)。为了获取每个研究区(县)更为精确的气象数据,运用由澳大利亚国立大学开发的气象空间插值方法Anusplin对气象数据进行插值。该方法是基于薄板样条函数模型,将经纬度作为自变量,将海拔作为协变量进行空间插值^[18-19]。在本研究中,利用全国698个气象监测站点的数据,插值分别形成分辨率为0.01°×0.01°的全国每日平均气温、每日最高温、每日最低温、每日相对湿度栅格数据。采用10折交叉方法对该插值方法的准确性进行验证,日均温度,日最高温度、日最低温度及每日相对湿度插值模型的决定系数分别为0.96, 0.94, 0.94和0.81。从全国每日栅格数据提取广东省40个研究区(县)的气象数据。

1.2 数据分析

1.2.1 每日YLL计算 利用2010年全国普查中广东省人口信息和死亡数信息,计算广东省居民寿命表。将死亡个例的性别与年龄匹配寿命表,计算每个死亡个体的YLL。然后分别汇总每日总YLL以及不同性别、年龄、死因的YLL值。由于各个研究区(县)YLL值与人口数相关,为了合并不同区县效应,用YLL值除以各个区(县)的人口数,得到YLL率(每10万人口YLL值)作为健康结局指标。

1.2.2 DTR和夜日温差(nocturnal temperature range, NTR)与人群YLL率的关系 把隔日温度变异分解为两部分:DTR与NTR(日最低气温与前一日最高气温之差),利用两阶段分析方法,即分布滞后非线性模型(distributed lag non-linear model, DLNM)结合多变量meta分析方法分别拟合DTR与YLL率以及NTR与YLL率的暴露-反应关系。

首先利用DLNM连接高斯函数分析单个区(县)DTR、NTR与YLL率的关系。DLNM可以同时考虑暴露-反应关系及暴露的滞后效应^[20],模型关系如下:

$$YLL_t = cb(Index, lag) + cb(tm, lag) + ns(time, u) + ns(rh, u) + \beta \cdot DOW,$$

式中:YLL_t表示第t天的YLL率;cb(Index, lag)表示DTR或NTR和滞后的交叉基函数,cb(tm, lag)指日均气温和滞后的交叉基函数,为了获取温度变异的总体效应以及控制总体的气温滞后效应,两个交叉基函数的滞后天数均为21d^[6, 15],根据以往的研究经验,交叉基中的样条函数自由度均为3^[11];ns表示自然平滑样条函数,u表示自由度,time为第t天相应的时间变量,以控制长期趋势,rh表示相对湿度,根据赤池信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)确定u:长期趋势为8年⁻¹,日相对湿度为3年⁻¹;β指回归系数,DOW为控制星期几效应的分类变量。

第二步将每个区(县)由DLNM构建的、用于表示DTR或NTR暴露-滞后-反应关系的二维系数,降维为仅表达累积暴露-反应关系的一维系数。利用多变量meta分析整合40个区(县)的结果,分析全省DTR与YLL率的关系以及NTR与YLL率的关系。基于全省的DTR和NTR的暴露-反应关系,提取不同DTR的归因YLL率以及不同NTR的归因YLL率。

1.2.3 温度变异指标的计算 TCN:某日平均气温与前一天平均气温之差。TV:两日的每日最高气温与最低气温的标准差。TTV:提取DTR与NTR对应的归因YLL率(分别为YLL_{DTR}与YLL_{NTR})作为权重,再计算TTV,公式如下:

$$TTV = (DTR \cdot YLL_{DTR} + NTR \cdot YLL_{NTR} + DTR_{lag1} \cdot YLL_{DTRlag1} + NTR_{lag1} \cdot YLL_{NTRlag1}) / (YLL_{DTR} + YLL_{NTR} + YLL_{DTRlag1} + YLL_{NTRlag1}),$$

其中,DTR_{lag1}、NTR_{lag1}分别为滞后1d的DTR、NTR,YLL_{DTRlag1}与YLL_{NTRlag1}分别为滞后1d的DTR和滞后1d的NTR对应的归因YLL率。

1.2.4 相关性分析 选择Pearson相关系数对温度变异指标(TCN、TV和TTV)进行相关性检验,检验水准α=0.05。

1.2.5 不同温度变异指标与YLL率的关系 运用上述DLNM结合多变量meta分析的二阶段方法,控制21d温度滞后效应、相对湿度、长期趋势和星期几效应这些因素,分别分析TCN、TV以及TTV与YLL率累积21d的暴露-反应的关系。比较各个指标在极端低(第5百分位数)、极端高(第95百分位数)、中等低(第25百分位数)和中等高(第75百分位数)节点上导致的YLL率效应值。为保证模型的稳定性,改变DLNM中时间变量u(7、8、9年⁻¹),对模型进行敏感性分析。

本次研究采用R 3.6.0软件进行统计分析,利用R包“dlnm”拟合DLNM,“mvmeta”包进行meta分析。

2 结果

2.1 描述性分析

2013—2017年广东省40个研究区(县)气象资料和居民每日YLL率的情况如表1所示。每日最高气温平均值为25.9℃,最低气温平均值为21.6℃,DTR和NTR平均值相同,均为7.6℃。经计算得到TCN、TV和TTV的平均值分别为0℃、4.6、8.1℃,3个指标均趋近正态分布。研究期间居民日均YLL率为22.3/10万。

表1 2013—2017年广东省40个区(县)气象变量及YLL率
Table 1 Meteorological data and YLL rate during 2013—2017 across 40 study locations in Guangdong, China

指标 Variable	$\bar{x} \pm s$	最小值 Min	P_{25}	P_{50}	P_{75}	最大值 Max
气象资料 Meteorological data						
最高气温/℃ Maximum temperature/℃	25.9±7.0	0.0	21.1	27.3	31.7	38.9
平均气温/℃ Mean temperature/℃	21.6±6.6	-0.7	16.6	23.1	27.2	33.0
最低气温/℃ Minimum temperature/℃	18.3±6.7	-4.0	13.2	20.0	24.0	28.9
相对湿度/% Relative humidity/%	78.6±10.4	26.0	73.0	80.0	86.0	100.0
DTR/℃	7.6±2.9	0.0	5.5	7.4	9.3	18.6
NTR/℃	7.6±2.9	0.0	5.6	7.5	9.4	17.4
TCN/℃	0.0±1.8	-13.7	-0.8	0.2	1.0	9.1
TV	4.6±1.5	0.5	3.5	4.5	5.4	12.3
TTV/℃	8.1±2.7	0.1	6.7	8.3	9.6	18.2
YLL率/ $\times 10^{-5}$ YLL rate/ $\times 10^{-5}$	22.3±14.1	0.0	12.7	20.3	29.4	192.5

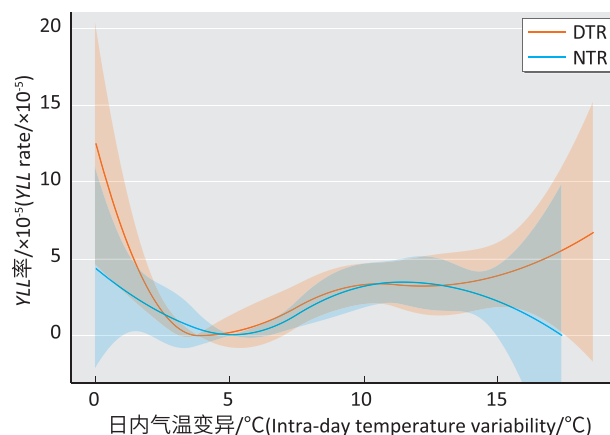
2.2 TCN、TV和TTV的相关性

分析结果显示,3个变量间的相关系数P值均小于0.001。其中:TCN与TV和TTV的相关性较低,相关系数仅为0.0979和0.0880;而TV与TTV的相关系数达到了0.8891,相关性较强。

2.3 DTR、NTR与YLL率的暴露-反应关系

图1展示的是DTR和NTR与居民YLL率的暴露-反应关系。过低或过高的DTR和NTR均可增加人群

的YLL率,但两者对人群YLL率的影响稍有不同。最低YLL率对应的DTR值和NTR值分别为3.8、5.0℃。在偏大或偏小的日内气温变异中,DTR所增加的YLL率均比NTR的大。



[注] 阴影部分为95%CI。[Note] The shaded area represents the 95%CI.

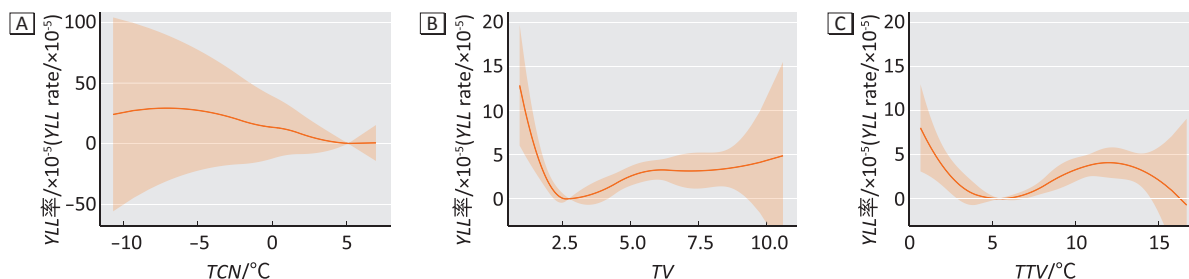
图1 2013—2017年广东省DTR与NTR与人群YLL率的暴露-反应关系

Figure 3 Exposure-response associations of YLL rate with DTR and NTR during 2013–2017 in Guangdong

2.4 不同隔日气温变异指标与YLL率的关系

从DTR、NTR与YLL率的暴露-反应关系提取不同DTR、NTR对应的归因YLL率计算TTV。在控制了平均气温的滞后效应后,TCN与YLL率的暴露-反应关系不存在统计学意义,而TV和TTV与YLL率的暴露-反应关系有统计学意义。TV-YLL和TTV-YLL暴露-反应关系曲线相似,均呈类似“U”型关系,过低或过高的TV和TTV均会增加人群的YLL率。最低YLL率拐点对应的TV值(百分位数)和TTV值(百分位数)分别为2.5(9.9%)、5.6(9.4%)。见图2。

极端低的TV(TV=2.2)和极端低的TTV(TTV=2.8℃)对应的YLL率效应值及其95%CI依次为1.0/10万(0.1/10万~1.9/10万)和2.1/10万(0.2/10万~4.0/10万),极端高的TV(TV=7.2)和TTV(TTV=12.1℃)对应的YLL率



[注] A: TCN; B: TV; C: TTV。阴影部分为95%CI。[Note] A: TCN; B: TV; C: TTV. The shaded area represents the 95%CI.

图2 不同隔日温度变异指标与YLL率的暴露-反应关系

Figure 2 Overall exposure-response associations of YLL rate with three indicators of temperature variability between neighboring days

效应值及其95%CI依次为3.1/10万(1.2/10万~5.1/10万)和4.1/10万(2.3/10万~5.8/10万)。在极端低和极端高节点上,TTV的YLL率效应值均大于TV,而在中等低和中等高节点上,两个指标的效应相近(表2)。

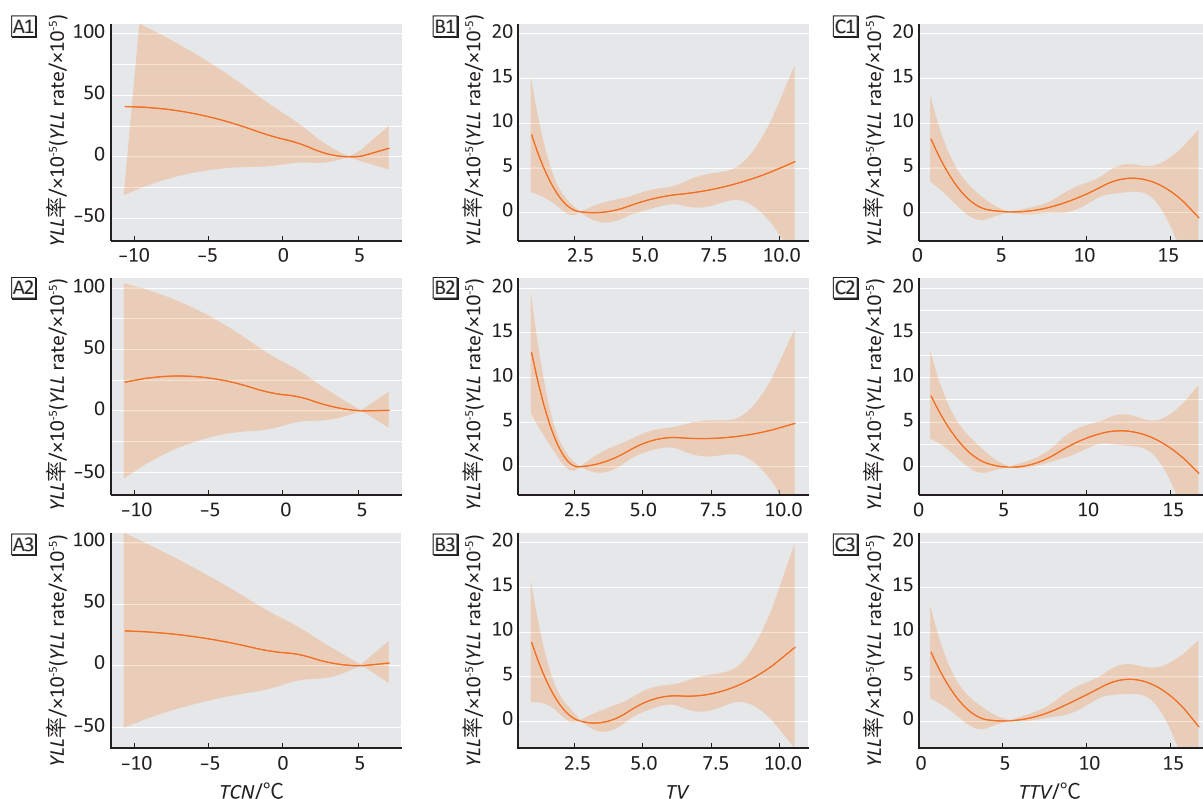
2.5 敏感性分析

改变模型中时间变量 u ,分别为7、8、9年⁻¹,分别代入TCN、TV、TTV与YLL率的模型中,拟合结果显示,参数改变对结果影响不大,说明模型的结果稳定(图3)。

表2 各个隔日温度变异指标在不同节点时的YLL率及其95%CI

Table 2 Attributable YLL rate associated with different indicators of temperature variability between neighboring days at different cutoffs $\times 10^{-5}$

指标 Indicator	极端低 (P_5) Extremely low (P_5)	中等低 (P_{25}) Moderately low (P_{25})	中等高 (P_{75}) Moderately high (P_{75})	极端高 (P_{95}) Extremely high (P_{95})
TCN	23.0 (-18.1~64.1)	15.0 (-15.0~45.1)	11.6 (-9.6~32.8)	6.4 (-8.5~21.1)
TV	1.0 (0.1~1.9)	0.5 (-0.7~1.6)	3.0 (1.8~4.1)	3.1 (1.2~5.1)
TTV	2.1 (0.2~4.0)	0.3 (-0.1~0.7)	2.9 (1.5~4.3)	4.1 (2.3~5.8)



[注] A: TCN; B: TV; C: TTV; 1: $u=7$; 2: $u=8$; 3: $u=9$ 。阴影部分为95%CI。

[Note] A: TCN; B: TV; C: TTV; 1: $u=7$; 2: $u=8$; 3: $u=9$. The shaded area represents the 95%CI.

图3 不同模型参数下各个隔日温度变异指标与总人群YLL率的暴露-反应关系

Figure 3 Pooled exposure-response associations between YLL rate and three indicators of temperature variability between neighboring days using alternative model parameters

3 讨论

本研究基于广东省40个研究区(县)资料,分析了不同隔日气温变异指标与居民寿命损失年的关系,创新性地提出TTV这个新指标,该指标同时考虑了气温变异大小、方向以及健康效应。研究结果发现,TV、TTV与居民YLL率存在关联,可增加人群的死亡负担,而TCN与YLL率的关系不具有统计学意义。

在既往的研究中,许多学者利用TCN分析了隔日气温变异与人群健康的关系。而大部分的研究结果表明:隔日升温增加人群死亡率而隔日降温减少人群死亡率;即使是在冬季,隔日降温仍是人群健康的保

护因素^[12-14, 21]。而事实上,大量生物学机制研究表明,人体温度调节系统对突然的升温或突然的降温均难以适应^[22],不稳定的气温模式会引起人体心率加快,外周血管收缩,血压、血浆纤维蛋白浓度、血胆固醇水平的上升以及免疫能力的下降^[22-26]。所以之前研究中发现的降温对人群健康的保护作用难以用生物学机制解释。而在本研究中,我们发现,在控制了温度的滞后效应后,TCN与人群YLL率不存在统计学意义。究其原因,一方面,既往的研究仅仅控制了3d滑动平均温度的影响而忽略了温度较长的滞后效应。许多研究已经表明,温度的滞后效应可以持续2~3周,尤其

是低温的滞后作用时间更长^[5, 27]。因此, 如果没有充分控制温度的滞后效应, 研究结果会高估 *TCN* 对人群健康的影响。另一方面, *TCN* 仅仅考虑前后两天的平均气温的差值, 该值大部分集中在 0°C 左右, 并没有考虑隔日最高气温和最低气温的变化程度和方向。例如今天最高、最低气温为 36、24°C, 明天最高、最低气温是 32、28°C, *TCN* 为 0°C, 这明显掩盖了隔日气温的变异。许多研究表明, *DTR* 会明显增加人群的死亡率^[11, 28-29], 在本研究中也发现 *DTR* 和 *NTR* 均能明显增加人群的 *YLL* 率。因此, 在探究隔日温度变异对人群健康影响时, 应该将 *DTR* 和 *NTR* 均纳入考虑。

既往也有研究发现 *TV* 增加人群死亡风险^[15, 30]。*TV* 指隔日最高气温和最低气温的标准差, 该指标同时考虑了日内变异和日间变异。本研究与既往的研究一致, 发现在控制了气温的滞后效应后, *TV* 增加了人群 *YLL* 率, 加重人群死亡负担。然而, 该指标仅仅计算最高气温和最低气温的标准差, 没有考虑气温变异的方向, 以及不同变异方向效应的差别。隔日气温变异存在降温和升温两个过程, 人体对降温和升温的生理学反应不同^[31]。因此在研究隔日气温变异对人群健康影响时, 应该考虑由于气温变异方向不同对人群健康影响可能存在的差异。

本研究提出了一个新的隔日气温变异指标, 通过 *DTR* 和 *NTR* 与人群 *YLL* 率的暴露-反应关系得到 *DTR* 和 *NTR* 的归因 *YLL* 率, 将各自的 *YLL* 率作为计算权重计算得到 *TTV*。虽然 *TTV* 与 *TV* 有强相关性, 但比起 *TV*, *TTV* 不仅考虑了隔日温度变异的程度, 还考虑了日夜间两个不同的气温变化方向的效应差别。在本研究也发现, 较低或较高范围的 *DTR* 与 *NTR* 的健康效应有所差别, 这一定程度表明气温变异方向的不同会产生不同的健康效应。将各自不同的效应考虑到隔日气温变异的衡量中, 能更加科学全面地揭示短时气温变异对人群的影响。研究结果表明过高或过低的 *TTV* 显著增加人群的 *YLL* 率。对比 *TV*、*TTV* 与 *YLL* 率的暴露-反应关系, 两者曲线趋势相似, 但在极端范围, *TTV* 的健康效应比 *TV* 的稍高, 这符合气温变异方向也会影响人群健康效应的假设。通过该指标可更加全面准确地评估隔日温度变异对人群健康产生的影响, 提醒相关决策部门和公众重视气温变异的健康危害, 有利于相关部门对短期气温变异的健康危害进行更精确的预警并制定更有效的适应性措施。

本研究存在一定的局限性。首先, 由于数据难以

获取, 未能将空气污染作为混杂因素控制; 但有研究认为空气污染对人群健康影响效应远小于气象因素对人群健康的影响^[32-34], 不会产生太大的混杂偏倚。第二, 将环境温度作为暴露指标, 可能与个体实际暴露温度存在差异。第三, 本研究仅局限于广东省, 广东省气温总体偏高, 四季不分明, 难以探究隔日气温变异对人群健康影响的季节差异性。在以后的研究中, 应进一步探索季节对隔日气温变异健康效应的影响。

综上, 本研究基于隔日气温变异的程度和方向均会影响人群健康的假设, 提出新的隔日气温变异指标 *TTV*, 并比较了 *TCN*、*TV* 和 *TTV* 与人群 *YLL* 率的暴露-反应关系。*TCN* 不能很好地揭示隔日气温变异对死亡的影响, *TV* 和 *TTV* 均能反映隔日气温变异对死亡的影响; 但比起 *TV*, *TTV* 考虑了气温变异的方向和程度, 可更准确地揭示隔日气温变异对死亡的影响。

参考文献

- [1] FU SH, GASPARRINI A, RODRIGUEZ PS, et al. Mortality attributable to hot and cold ambient temperatures in India : a nationally representative case-crossover study [J]. *PLoS Med*, 2018, 15 (7) : e1002619.
- [2] GUO Y, GASPARRINI A, ARMSTRONG BG, et al. Heat wave and mortality : a multicountry, multicomunity study [J]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125 (8) : 087006.
- [3] RYTI NR, GUO Y, JAAKKOLA JJ. Global association of cold spells and adverse health effects : a systematic review and Meta-Analysis [J]. *Environ Health Perspect*, 2016, 124 (1) : 12-22.
- [4] SCOVRONICK N, SERA F, ACQUAOTTA F, et al. The association between ambient temperature and mortality in South Africa : a time-series analysis [J]. *Environ Res*, 2018, 161 : 229-235.
- [5] CHEN R, YIN P, WANG L, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden : time series study in 272 main Chinese cities [J]. *BMJ*, 2018, 363 : k4306.
- [6] GASPARRINI A, GUO Y, HASHIZUME M, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature : a multicountry observational study [J]. *Lancet*, 2015, 386 (9991) : 369-375.
- [7] MA W, WANG L, LIN H, et al. The temperature-mortality relationship in China : an analysis from 66 Chinese communities [J]. *Environ Res*, 2015, 137 : 72-77.
- [8] LI J, XU X, YANG J, et al. Ambient high temperature and

- mortality in Jinan, China : a study of heat thresholds and vulnerable populations [J] . *Environ res*, 2017, 156 : 657-664.
- [9] WANG L, LIU T, HU M, et al. The impact of cold spells on mortality and effect modification by cold spell characteristics [J] . *Sci Rep*, 2016, 6 (1) : 38380.
- [10] SHARAFKHANI R, KHANJANI N, BAKHTIARI B, et al. Diurnal temperature range and mortality in Urmia, the Northwest of Iran [J] . *J Therm Biol*, 2017, 69 : 281-287.
- [11] 赵永谦, 王黎君, 罗圆, 等. 中国 66 个县/区日温差对人群死亡影响的时间序列研究 [J] . *中华流行病学杂志*, 2017, 38 (3) : 290-296.
- [12] GUO Y, BARNETT A G, YU W, et al. A large change in temperature between neighbouring days increases the risk of mortality [J] . *PLoS One*, 2011, 6 (2) : e16511.
- [13] LIN H, ZHANG Y, XU Y, et al. Temperature changes between neighboring days and mortality in summer : a distributed lag non-linear time series analysis [J] . *PLoS One*, 2013, 8 (6) : e66403.
- [14] ZHAN Z, ZHAO Y, PANG S, et al. Temperature change between neighboring days and mortality in United States : a nationwide study [J] . *Sci Total Environ*, 2017, 584-585 : 1152-1161.
- [15] GUO Y, GASPARRINI A, ARMSTRONG B G, et al. Temperature variability and mortality : a multi-country study [J] . *Environ Health Perspect*, 2016, 124 (10) : 1554-1559.
- [16] HUANG C, BARNETT A G, WANG X, et al. Effects of extreme temperatures on years of life lost for cardiovascular deaths : a time series study in Brisbane, Australia [J] . *Circ Cardiovasc Qual Outcomes*, 2012, 5 (5) : 609-614.
- [17] YANG J, OU C Q, GUO Y, et al. The burden of ambient temperature on years of life lost in Guangzhou, China [J] . *Sci Rep*, 2015, 5 : 12250.
- [18] CHEN K, ZHOU L, CHEN X, et al. Urbanization level and vulnerability to heat-related mortality in Jiangsu province, China [J] . *Environ Health perspect*, 2016, 124 (12) : 1863-1869.
- [19] HUTCHINSON M F, XU T. ANUSPLIN version 4.4 user guide [EB/OL] . [2020-01-03] . <http://fennerschool.anu.edu.au/files/anusplin44.pdf>.
- [20] GASPARRINI A. Distributed lag linear and non-linear models in R : the package dlnm [J] . *J Stat Softw*, 2011, 43 (8) : 1-20.
- [21] CHENG J, ZHU R, XU Z, et al. Temperature variation between neighboring days and mortality : a distributed lag non-linear analysis [J] . *Int J Public Health*, 2014, 59 (6) : 923-931.
- [22] MARTINEZ-NICOLAS A, MEYER M, HUNKLER S, et al. Daytime variation in ambient temperature affects skin temperatures and blood pressure : ambulatory winter/summer comparison in healthy young women [J] . *PhysiolBehav*, 2015, 149 : 203-211.
- [23] GARRETT A T, GOOSENS N G, REHRER N J, et al. Induction and decay of short-term heat acclimation [J] . *Eur J Appl Physiol*, 2009, 107 (6) : 659-670.
- [24] HALONEN J I, ZANOBBETTI A, SPARROW D, et al. Associations between outdoor temperature and markers of inflammation : a cohort study [J] . *Environ Health*, 2010, 9 : 42.
- [25] HALONEN J I, ZANOBBETTI A, SPARROW D, et al. Outdoor temperature is associated with serum HDL and LDL [J] . *Environ Res*, 2011, 111 (2) : 281-287.
- [26] HALONEN J I, ZANOBBETTI A, SPARROW D, et al. Relationship between outdoor temperature and blood pressure [J] . *Occup Environ Med*, 2011, 68 (4) : 296-301.
- [27] GUO Y, PUNNASIRI K, TONG S. Effects of temperature on mortality in Chiang Mai city, Thailand : a time series study [J] . *Environ Health*, 2012, 11 (1) : 36.
- [28] DING Z, GUO P, XIE F, et al. Impact of diurnal temperature range on mortality in a high plateau area in southwest China : a time series analysis [J] . *Sci Total Environ*, 2015, 526 : 358-365.
- [29] LIM Y H, REID C E, MANN J K, et al. Diurnal temperature range and short-term mortality in large US communities [J] . *Int J of Biometeorol*, 2015, 59 (9) : 1311-1319.
- [30] MA C, YANG J, NAKAYAMA S F, et al. The association between temperature variability and cause-specific mortality : evidence from 47 Japanese prefectures during 1972-2015 [J] . *Environ Int*, 2019, 127 : 125-133.
- [31] SCHNEIDER A, SCHUH A, MAETZEL F K, et al. Weather-induced ischemia and arrhythmia in patients undergoing cardiac rehabilitation : another difference between men and women [J] . *Int J Biometeorol*, 2008, 52 (6) : 535-547.
- [32] REN C, O'NEILL M S, PARK S K, et al. Ambient temperature, air pollution, and heart rate variability in an aging population [J] . *Am J Epidemiol*, 2011, 173 (9) : 1013-1021.
- [33] SPICKETT J T, BROWN H L, RUMCHEV K. Climate change and air quality : the potential impact on health [J] . *Asia Pac J Public Health*, 2011, 23 (S2) : 375-455.
- [34] XIE H, YAO Z, ZHANG Y, et al. Short-term effects of the 2008 cold spell on mortality in three subtropical cities in Guangdong Province, China [J] . *Environ Health Perspect*, 2013, 121 (2) : 210-216.

(英文编辑：汪源；责任编辑：王晓宇)