

人群对温度适应性的研究进展

王裕新, 黄婧, 李国星

北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系, 北京 100191



DOI 10.11836/JEOM21564

摘要:

气温是与人类生活密切相关的环境因素, 全球气候变化导致极端气象事件和气候异常发生频率和强度呈增加态势, 对人体健康造成的不良影响也日益受到关注。近年来, 在气候变化和城市化进程不断推进的背景下, 人群对热和/或冷影响的易感性随时间变化的流行病学证据不断出现, 本文首先总结了适应性的定义, 其次回顾了国内外温度健康风险及其时间变化的相关研究, 探讨不同研究中人群对温度适应性是否存在的结论; 再次, 对适应性影响因素的研究进展进行了综述。最后, 本文归纳了适应性相关研究中的常用分析方法, 并针对适应性探索性研究存在的局限性提出展望。合理识别人群对温度的适应性对未来气候健康影响评估与预测具有重要科学意义。

关键词: 温度; 气候变化; 适应性; 时间变化; 影响因素

Research progress on population adaptation to temperature WANG Yuxin, HUANG Jing, LI Guoxing (Department of Occupational and Environmental Health Sciences, School of Public Health, Peking University, Beijing, 100191)

Abstract:

Temperature is an environmental factor closely related to human daily life. Global climate change has led to an increase in the frequency and intensity of extreme meteorological events and climate anomalies. The associated adverse health also attracted public attention. Recently, with the processes of climate change and urbanization, epidemiological evidence pointing to a temporal change of population susceptibility to heat and/or cold over time has emerged. This paper summarized the definition of adaptation and then reviewed the studies on temporal change in temperature-related health risks at home and abroad, exploring whether the adaptation to temperature confirmed among different. Next, the research progress of influencing factors of adaptation. Finally, the common analytical methods of adaptation were reviewed. We also put forward an outlook based on the limitations of current exploratory studies. Rational identification of adaptation to temperature is of important scientific significance for the evaluation and prediction of the health effect of future climate.

Keywords: temperature; climate change; adaptation; temporal variation; influencing factors

作者简介

王裕新(1997—), 女, 硕士生;
E-mail: yuxin_wang@bjmu.edu.cn

通信作者

李国星: liguoxing@bjmu.edu.cn

伦理审批 不需要
利益冲突 无申报
收稿日期 2021-11-12
录用日期 2022-08-16

文章编号 2095-9982(2022)10-1187-05

中图分类号 R122.2

文献标志码 A

引用

王裕新, 黄婧, 李国星. 人群对温度适应性的研究进展[J]. 环境与职业医学, 2022, 39(10): 1187-1191.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21564

Correspondence to

LI Guoxing, E-mail: liguoxing@bjmu.edu.cn

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-11-12

Accepted 2022-08-16

To cite

WANG Yuxin, HUANG Jing, LI Guoxing. Research progress on population adaptation to temperature[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(10): 1187-1191.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21564

气候变化已成为全球公共卫生的一个重要问题^[1], 极端温度事件如热浪的发生频率、强度和持续时间不断增加^[2], 对全球各国人群健康产生了不利影响, 如与温度普遍升高相关的死亡率和发病率的变化等^[3]。1956—2015年中国200个气象站点的气温数据显示, 我国各气候区温度指标整体上表现出变暖趋势, 且极端温度指标在1986—2015年的变化趋势相对1956—1985年更为显著, 这与全球大部分地区变化情况类似^[4]; 作为亚洲人口大国, 我国人口构成复杂, 气候、社会和文化空间异质性大, 更易受到气候异常事件的健康影响^[2]。从长期角度来看, 忽视人群的适应性可能造成健康风险的错误估计, 导致卫生资源的过度消耗和不合理利用。因此, 在气候变化的背景下, 对人群对温度适应性进行验证和探索性研究, 有助于正确认识温度对人群健康的影响和人群对温度的适应, 从而为进一步应对气候变化提供科学证据。

1 适应性的定义

2014年, 联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on

Climate Change, IPCC)将“适应性”(adaptation)定义为人类系统为适应新的或不断变化的环境做出的自然调整。适应气候变化是指对自然或人类系统进行调整以应对实际或预期的气候变化或其影响,从而减轻危害或增加收益。^[5]2016年,Arbuthnott等^[6]将人口对热和/或冷的适应性定义为降低对人口健康或卫生系统的有害影响,应对实际或预期的温度变化做出的调整,而这是通过死亡率或发病率的降低来衡量的。例如,有计划的适应将包括特定的结构或政策干预措施,以降低人群对高温影响的敏感性。

既往对温度与死亡关联的时间趋势变化研究指出,从过去到现在乃至未来的几十年甚至上百年,由热或冷导致的死亡相对风险随时间发生变化,表现出人群对温度的易感性可能产生变化。本文将人群对温度适应性定义为人群对热和/或冷影响的易感性的时间变化,主要表现归纳为温度对死亡(等健康结局)影响的相对危险度(relative ratio, RR)随时间发生变化^[7]。

2 国内外研究现状

从研究地点和时间来看,现有研究可分为单中心研究和多中心研究,两者均主要集中在高收入国家或地区,单中心研究的地点包括美国纽约、德国奥格斯堡、中国上海、澳大利亚昆士兰州等地。多中心研究则包括日本47县、西班牙47城市、韩国7城市等国家内部多城市研究;中国台湾、日、韩等亚洲多地区研究以及全球多地研究,涉及城市绝大多数仍为较发达城市。相比之下,中国目前只有上海市徐汇区和宁波市开展了单中心研究,且未观察到高温效应的明确变化,而多中心研究仍有待开展。就研究时段来说,现有回顾性研究最长横跨1900—2006年近一个世纪,预测性研究同样最长包含2009—2100年,其他多数研究主要集中在20世纪后半半个世纪至21世纪初,研究时间的长短主要取决于资料的可及性,发达地区的数据保存完整性和可及性也是其开展研究的重要依托。

从研究内容来看,人群对温度的适应性主要着眼于温度对健康结局短期效应的年际变化,目前仅有少数研究探索了温度的长期效应。国外大多数早期研究侧重于探究热与死亡的关联,其中研究结局基本是全因死亡和非意外死亡,而在近几年的研究以及多中心研究中,健康结局有所扩展,涉及到循环系统、呼吸系统疾病死亡和寿命损失年,心肌梗塞等心血管疾病住院数等。此外,研究主要关注人群对高温的适应性,较少研究关注到低温,且低温的适应性探索中也未得出

明确结论。

从研究结果来看,人群关于高、低温的适应性研究结论仍存在不一致的情况。如国内两项研究中,中国宁波2013年热浪前后温度与寿命损失年关系变化的研究发现人群对低温的冷适应性不断增加,但对高温的热适应性未发生变化^[8];2015年我国上海中心城区的类似研究结果发现在过去的30年里,上海居民对低温产生了适应^[9]。国外相关研究的结果也存在异质性。有研究指出人群对热产生一定的适应性:纽约跨越20世纪、21世纪的热相关死亡率研究结果指出人体对热的敏感性下降^[10],得出类似结论的还包括日本福冈县^[11]、亚洲东北部的研究^[12]。就低温而言,2018年立陶宛维尔纽斯市的研究指出,冷相关死亡率随时间下降,但不能抵消热相关死亡的上升^[13]。澳大利亚昆士兰州一项病例交叉研究关注心血管疾病的住院情况,发现低温对心血管疾病住院率的影响呈降低趋势^[14],以上两个研究均说明人群对冷可能产生了适应;而2019年德国一项类似研究探索了气温与心肌梗塞风险的时间变化,其结果却指出风险没有显著下降^[15]。2018年有学者在全球10个国家共305个城市或地区开展了多中心研究,结果表明,在过去的几十年中,热对死亡率的影响有所下降,人群对热的适应性远远超出了纯粹由全球变暖导致的适应。相比之下,没有发现全球关于低温的明确结论^[16]。2016年,Arbuthnott等^[6]对多篇相关文献进行了综合比较,11篇量化了热相关的死亡风险的文献中,有10篇发现人群对热的易感性随时间而降低,其中5篇发现下降幅度显著。只有1项研究发现与寒冷有关的死亡率显著下降。因此,在既往研究的基础上,仍需深入开展多城市研究,关注人群冷适应性的特征,完善现有研究结果。

3 适应性的影响因素研究现状

适应性在很大程度上与适应过程有关,除了包括地理位置、气候区、气候变暖的程度等气候驱动因素外^[17],适应过程可能通过人体对温度变化的生理适应反应(内在或因果适应)^[18]或非气候驱动因素(外在适应)产生,如社会经济发展或改善的医疗保健服务^[19]。可见,归因于温度的死亡率随时间发生的变化主要取决于地理位置、气候变暖的幅度^[20],以及社会应对和适应气候变化的能力^[21],如建立城市极端温度预警系统,提高空调覆盖率,加强民众健康教育等。

首先,从气候驱动因素来说,近年来全球变暖趋势渐趋凸显,温室气体浓度的稳步增加正在导致平均

气温明显升高, 人群对温度的敏感性可能发生潜在变化^[22]。其次, 从生理适应角度来说, Kristensen 等^[18]提出, 不同时间尺度下对环境应激的适应存在种群上的长期进化适应、中期继代效应和短期可塑性反应等, 强调生理适应反应相关因素对适应性的影响。再次, 从外在驱动因素考虑, 有研究推测适应性的产生可能与社会经济因素有关, 如人口老龄化、空调使用率及经济水平等^[19]。空调作为近年来的重要家电, 可能对人体适应温度有所帮助。2009 年美国的研究发现: 不同地区空调使用率是人群对热反应存在差异的主要影响因素^[23], 然而也有研究显示随着时间的推移, 热相关死亡风险与空调使用率之间没有关联^[6]。

在观察温度对死亡影响的时间变化趋势研究中, 由于缺乏必要的个人信息, 很难直接解释随时间变化的气温健康效应机制, 因此, 温度对死亡影响的效应修饰因子研究也为我们探讨人群对温度适应性的影响提供了参考。我国一项多中心研究评估了热浪与寒潮特征对心血管疾病死亡率的影响, 同时还探索了医疗服务可及性、人口密度、老年人口比例等社会经济因素对热浪、寒潮特征健康影响的修饰作用^[24], 此外, 一篇全球多国研究通过将绿地等城市因素纳入模型进行综合估计, 提出健康不公平、空气污染增加、绿地减少和卫生服务可获得性下降都会导致高温的健康效应增强, 进一步证明了城市环境和卫生服务等区域水平因素对适应性的影响^[25]。

综上, 适应性的影响因素可归纳为气候驱动因素、生理适应因素和社会经济因素三个维度, 其中气候驱动因素包括地理位置、气候变暖的幅度、气候带等; 生理适应因素包括人类生理适应、进化适应等; 社会经济因素包括教育、健康素养、老年人口比例、经济发展水平、城市热预警系统、绿地、空调使用等。

4 适应性的常用分析方法

目前温度对健康影响的流行病学证据通常基于观察性研究, 多采用时间序列分析, 类似的, 观测适应性是否存在的相关研究也常采用时间序列分析^[8, 12], 时间序列分析是基于一定时间尺度的时间序列数据, 通过曲线拟合和参数估计(如非线性最小二乘法)来建立模型的方法^[26]。由于温度对死亡的影响呈现非线性的关系^[27-28], 目前应用于气温对健康影响研究的时间序列模型主要是广义相加模型(generalized additive model, GAM)和分布滞后非线性模型(distributed lags non-linear model, DLNM)^[17, 29], 通过控制时间趋势、季

节效应、星期效应和其他气象因素等混杂因素的影响, 得到更精确的结果^[17]。DLNM 相较于 GAM, 能够更好地体现温度对健康影响的滞后性和累积效应。当其应用于小数据集时, 如单个城市的单一年份, 所拟合的暴露-反应关系受极端值影响较大^[30]。为追求稳定性, 多数研究选择将数十年数据集拆分成两个或多个子数据集来研究气温健康效应的长期趋势, 因此随时间变化的 DLNM 这一新方法被提出^[31]; 相较于普通 DLNM, 时变 DLNM 加入了时间变量与交叉基函数的交互项, 以探究随时间变化的气温—滞后—死亡非线性关系^[32]。时变 DLNM 能很好地估计某特定气温的效应随时间变化的速率, 在不同年份之间的结果也保持相对稳定^[30]。但时变 DLNM 也有其应用局限性, 该设计的重要假设(气温—滞后—死亡效应)是随时间的线性变化, 但实际气温的效应可能为非线性变化^[30]。

2019 年一项在德国奥格斯堡地区实施的探究短期气温暴露与心肌梗塞风险时间变化的研究和 2020 年澳大利亚昆士兰州一项类似研究应用了时间分层的病例交叉设计^[14-15]。在探究人群对温度的适应性时, 由于常涉及到环境污染因素、气象因素、季节因素等变量, 因此适用于多变量时间序列数据的病例交叉设计常应用于极端天气事件对人群健康影响的研究^[29]。Maclure^[33]在 1991 年首次提出了病例交叉研究(case-crossover study)这种探究短期暴露对罕见病的急性发作的方法。以研究对象自身经历的不同时期设定危险期(暴露对疾病结局发挥效应的时间段)和对照期(未发生疾病结局的参照时间段), 将时间分层, 通过比较个体在不同时期的暴露情况得出疾病与暴露的关联^[34]。病例期和对照期通常处于同一年、月和星期几, 既往研究通过统计模拟发现, 时间分层的病例交叉设计较好地避免了暴露的时间关联导致的个体内部混杂偏倚^[35]。

此外, 在进行温度相关死亡率预测时, 人们常用如相对或绝对阈值偏移等建模来体现适应性^[36-37]。有研究对最高温度与脑卒中寿命损失年进行了关联分析, 假设未来人群对热的适应性表现为最适温度和/或热效应大小的改变, 基于不同排放情景, 对热的不良健康影响进行预测, 结果显示低排放情景下, 2050 年和 2070 年热效应大小降低 20%和 8%, 可抵消全球变暖对健康的不良影响。但中、高排放情景下, 热效应降低 25%依然无法抵消全球变暖带来的不利影响^[36]。

5 研究局限性与展望

第一, 尽管全球气温呈升高趋势, 人群对温度适

应性研究不应只关注热适应性。气候变化风险评估表明,直到本世纪末,寒冷的风险预计将占温度相关健康风险的绝大部分(主要由于相对风险值的大小和低温所占的天数较多)^[38]。因此,有必要深入开展相关研究,准确识别人群热和冷适应性,以便为抵御温度降低相关健康风险做好准备。

第二,现有研究多数针对个别城市开展,未能捕捉温度的健康影响及其时间变化的区域分异规律,如生活在南方地区的居民长期处在低纬度地区,全年较高的气温使当地居民更易受到寒潮的影响^[39],而热浪则正好相反。既往研究也指出,非最佳天气条件对健康的影响因不同人群而异,这种差异可以通过当地人口的生理适应(如建筑结构和饮食摄入量)、行为和意识方面的差异来体现^[40],因此应描述不同人群之间适应性特征的异同。为增强结果的可比性,未来的研究需要对不同区域的适应性进行评估,建立统一的指标去评价这种地域气候差异带来的健康影响差异,从而明确脆弱地区和脆弱人群,以更好地应对气候变化^[41]。

20世纪以来,温度相关的健康风险发生了变化,但发展中国家的研究证据仍不足,因此亟须开展人群对温度适应性相关研究。首先,应进一步完善研究的温度谱,同时关注冷和热适应性;其次,还需对不同亚组人群和区域分别进行评估,科学精准识别人群对热和冷的适应性及其影响因素,有利于准确预测未来气候变化对健康的潜在风险,这对建立城市极端温度预警机制,制定相应的气候变化应对政策,提高对脆弱人群的保护程度具有重大的公共卫生意义。

参考文献

- [1] WATTS N, AMANN M, AYEB-KARLSSON S, et al. The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health[J]. *Lancet (London, England)*, 2018, 391(10120): 581-630.
- [2] YANG Z, WANG Q, LIU P. Extreme temperature and mortality: evidence from China[J]. *International journal of biometeorology*, 2019, 63(1): 29-50.
- [3] KAN H, LONDON SJ, CHEN G, et al. Season, sex, age, and education as modifiers of the effects of outdoor air pollution on daily mortality in Shanghai, China: The Public Health and Air Pollution in Asia (PAPA) Study[J]. *Environmental health perspectives*, 2008, 116(9): 1183-1188.
- [4] 张大任, 郑静, 范军亮, et al. 近60年中国不同气候区极端温度事件的时空变化特征[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(07): 422-434.
- [5] ZHANG DR, ZHENG J, FAN JL, et al. Spatiotemporal Variations of Extreme Temperature Indices in Different Climatic Zones of China over the Past 60 Years[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(07): 422-434.
- [6] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability[C]. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [7] ARBUTHNOTT K, HAJAT S, HEAVISIDE C, et al. Changes in population susceptibility to heat and cold over time: assessing adaptation to climate change [J]. *Environmental health: a global access science source*, 2016, 15 Suppl 1(Suppl 1): 33.
- [8] ACHEBAK H, DEVOLDER D, BALLESTER J. Heat-related mortality trends under recent climate warming in Spain: A 36-year observational study[J]. *PLoS medicine*, 2018, 15(7): e1002617.
- [9] LI G, HUANG J, XU G, et al. Temporal variation in associations between temperature and years of life lost in a southern China city with typical subtropical climate[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 4650.
- [10] YANG C, MENG X, CHEN R, et al. Long-term variations in the association between ambient temperature and daily cardiovascular mortality in Shanghai, China[J]. *The Science of the total environment*, 2015, 538: 524-530.
- [11] PETKOVA EP, GASPARRINI A, KINNEY PL. Heat and mortality in New York City since the beginning of the 20th century[J]. *Epidemiology (Cambridge, Mass)*, 2014, 25(4): 554-560.
- [12] ONOZUKA D, HAGIHARA A. Variation in vulnerability to extreme-temperature-related mortality in Japan: A 40-year time-series analysis[J]. *Environmental research*, 2015, 140: 177-184.
- [13] CHUNG Y, NOH H, HONDA Y, et al. Temporal Changes in Mortality Related to Extreme Temperatures for 15 Cities in Northeast Asia: Adaptation to Heat and Maladaptation to Cold[J]. *American journal of epidemiology*, 2017, 185(10): 907-913.
- [14] MARTINEZ GS, DIAZ J, HOOYBERGHS H, et al. Cold-related mortality vs heat-related mortality in a changing climate: A case study in Vilnius (Lithuania)[J]. *Environmental research*, 2018, 166: 384-393.
- [15] LU P, XIA G, ZHAO Q, et al. Temporal trends of the association between ambient temperature and hospitalisations for cardiovascular diseases in Queensland, Australia from 1995 to 2016: A time-stratified case-crossover study[J]. *PLoS medicine*, 2020, 17(7): e1003176.
- [16] CHEN K, BREITNER S, WOLF K, et al. Temporal variations in the triggering of myocardial infarction by air temperature in Augsburg, Germany, 1987-2014[J]. *European heart journal*, 2019, 40(20): 1600-1608.
- [17] VICEDO-CABRERA AM, SERA F, GUO Y, et al. A multi-country analysis on potential adaptive mechanisms to cold and heat in a changing climate[J]. *Environment international*, 2018, 111: 239-246.
- [18] GASPARRINI A, GUO Y, HASHIZUME M, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study[J]. *Lancet (London, England)*, 2015, 386(9991): 369-375.
- [19] KRISTENSEN TN, KETOLA T, KRONHOLM I. Adaptation to environmental stress at different timescales[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2020, 1476(1): 5-22.
- [20] CHUNG Y, YANG D, GASPARRINI A, et al. Changing Susceptibility to Non-Optimum Temperatures in Japan, 1972-2012: The Role of Climate, Demographic, and Socioeconomic Factors[J]. *Environmental health perspectives*, 2018, 126(5): 057002.
- [21] GASPARRINI A, GUO Y, SERA F, et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios[J]. *The Lancet Planetary health*, 2017, 1(9): e360-e367.
- [22] 马文军, 刘涛, 黄存瑞. 气候变化对人群健康的风险评估和适应性研究亟需加强[J]. *环境卫生学杂志*, 2018, 8(5): 365-367.
- [23] MA WJ, LIU T, HUANG CR. Research on risk assessment and adaptation of climate change to population health needs to be strengthened

- urgently[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2018, 8(5): 365-367.
- [22] BALLESTER J, ROBINE JM, HERRMANN FR, et al. Long-term projections and acclimatization scenarios of temperature-related mortality in Europe[J]. *Nature communications*, 2011, 2: 358.
- [23] REID CE, O'NEILL MS, GRONLUND CJ, et al. Mapping community determinants of heat vulnerability[J]. *Environmental health perspectives*, 2009, 117(11): 1730-1736.
- [24] CHEN J, ZHOU M, YANG J, et al. The modifying effects of heat and cold wave characteristics on cardiovascular mortality in 31 major Chinese cities[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 105009.
- [25] SERA F, ARMSTRONG B, TOBIAS A, et al. How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold: a multi-country analysis[J]. *International journal of epidemiology*, 2019, 48(4): 1101-1112.
- [26] ZEGER SL, IRIZARRY R, PENG RD. On time series analysis of public health and biomedical data[J]. *Annual review of public health*, 2006, 27: 57-79.
- [27] ZHAO Q, ZHANG Y, ZHANG W, et al. Ambient temperature and emergency department visits: Time-series analysis in 12 Chinese cities[J]. *Environmental pollution (Barking, Essex:1987)*, 2017, 224: 310-316.
- [28] GUO Y, GASPARRINI A, ARMSTRONG B, et al. Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation[J]. *Epidemiology (Cambridge, Mass)*, 2014, 25(6): 781-789.
- [29] GUO Y, BARNETT AG, PAN X, et al. The impact of temperature on mortality in Tianjin, China: a case-crossover design with a distributed lag nonlinear model[J]. *Environmental health perspectives*, 2011, 119(12): 1719-25.
- [30] 赵琦, 李珊珊, 郭玉明. 随时间变化的分布滞后非线性模型应用介绍: 以气温与死亡关系为例[J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(1): 9-14.
- ZHAO Q, LI SS, GUO YM. Time-varying distributed lag non-linear model: Using temperature-mortality association as an example[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2020, 37(1): 9-14.
- [31] GASPARRINI A, GUO Y, HASHIZUME M, et al. Temporal Variation in Heat-Mortality Associations: A Multicountry Study[J]. *Environmental health perspectives*, 2015, 123(11): 1200-7.
- [32] GASPARRINI A, GUO Y, HASHIZUME M, et al. Changes in Susceptibility to Heat During the Summer: A Multicountry Analysis[J]. *American journal of epidemiology*, 2016, 183(11): 1027-36.
- [33] MACLURE M. The case-crossover design: a method for studying transient effects on the risk of acute events[J]. *American journal of epidemiology*, 1991, 133(2): 144-53.
- [34] 胡以松. 病例交叉研究[J]. *疾病控制杂志*, 2001, 04: 341-343.
- HUYS. Case-crossover study[J]. *Journal of Disease Control*, 2001, 04: 341-343.
- [35] JANES H, SHEPPARD L, LUMLEY T. Case-crossover analyses of air pollution exposure data: referent selection strategies and their implications for bias[J]. *Epidemiology (Cambridge, Mass)*, 2005, 16(6): 717-726.
- [36] LI G, GUO Q, LIU Y, et al. Projected Temperature-Related Years of Life Lost From Stroke Due To Global Warming in a Temperate Climate City, Asia: Disease Burden Caused by Future Climate Change[J]. *Stroke*, 2018, 49(4): 828-34.
- [37] GOSLING SN, HONDULA DM, BUNKER A, et al. Adaptation to Climate Change: A Comparative Analysis of Modeling Methods for Heat-Related Mortality[J]. *Environmental health perspectives*, 2017, 125(8): 087008.
- [38] VARDOULAKIS S, DEAR K, HAJAT S, et al. Comparative assessment of the effects of climate change on heat- and cold-related mortality in the United Kingdom and Australia[J]. *Environmental health perspectives*, 2014, 122(12): 1285-1292.
- [39] CHEN J, YANG J, ZHOU M, et al. Cold spell and mortality in 31 Chinese capital cities: Definitions, vulnerability and implications[J]. *Environment international*, 2019, 128: 271-278.
- [40] WANG L, LIU T, HU M, et al. The impact of cold spells on mortality and effect modification by cold spell characteristics[J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 38380.
- [41] VANOS JK, BALDWIN JW, JAY O, et al. Simplicity lacks robustness when projecting heat-health outcomes in a changing climate[J]. *Nature communications*, 2020, 11(1): 6079.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 顾心怡, 陈姣)