多时间尺度气温暴露的健康效应研究进展

刘恒毅，薛 涛

北京大学 公共卫生学院生育健康研究所/国家卫生健康委生育健康重点研究室，北京 100191

摘要：全球气候变化导致地表温度持续升高及极端天气事件频发，气温暴露已成为威胁人类健康的重要环境风险因素。目前环境流行病学研究在评估气温健康效应时，用到了小时气温、日平均气温、长期平均温度及气温变异等覆盖多时间维度的暴露评估指标。这些指标虽然从不同角度证实了气温暴露的健康危害，但现有评估体系依然缺乏对暴露指标的系统性整合。本文系统梳理气温短期暴露、长期暴露、气温波动等指标的健康效应与病理生理机制，阐明短期暴露主要引发急性生理失代偿，而长期暴露可造成慢性健康损害不断累积。最后，从跨时间尺度的视角，探讨了长期气候基线与短期气温变化之间的内在数理关系，为构建综合性气候健康风险评估框架提供方法学的参考。

关键词：气候变化；多尺度暴露；日平均气温；气温变异；健康风险；流行病学

中图分类号：R122.2 **文献标识码：**A DOI：10.13885/j.issn.2097-681X.T20260033

Progress in research on the health effects of multi-temporal scale temperature exposure

LIU Hengyi, XUE Tao

Institute of Reproductive and Child Health / National Health Commission Key Laboratory of Reproductive Health and Department of Epidemiology and Biostatistics / Ministry of Education Key Laboratory of Epidemiology of Major Diseases, School of Public Health, Peking University Health Science Centre, Beijing 100191 China

Abstract: Driven by global climate changes, the continuous rise in ambient temperatures and the increased frequency of extreme weather events have rendered temperature exposure a critical environmental risk threatening human health. Current environmental epidemiological studies evaluating the health effects of temperature employ exposure assessment metrics that span multiple temporal dimensions, including daily mean temperature, hourly temperature, long-term average temperature, and temperature variability. While these metrics have substantiated the adverse health impacts of temperature exposure from various perspectives, existing assessment frameworks are still in lack of a systematic integration of these exposure indicators. This paper systematically reviewed the health effects and pathophysiological mechanisms associated with metrics such as short-term temperature exposure, long-term exposure, and temperature fluctuations, elucidating that a short-term exposure primarily triggers acute physiological decompensation, whereas a long-term exposure leads to a continuous accumulation of chronic health impairments. Finally, from a cross-temporal perspective, this paper attempted to explore the intrinsic mathematical relationship between long-term climate baselines and short-term temperature variations, thereby providing a methodological reference for establishing a comprehensive climate-health risk assessment framework.

Keywords: climate changes; multi-scale exposure; daily mean temperature; temperature variability; health risk; epidemiology

收稿日期：2026-02-11 **修回日期：**2026-02-28 **接受日期：**2026-03-01

基金项目：国家自然科学基金会面上资助项目（42375179）；西藏自治区科技计划资助项目（XZ202501ZY0072）

作者简介：薛 涛，男，研究员，博士研究生导师，国家优秀青年科学基金获得者，研究方向为基于多源数据的不良环境暴露及健康风险评估，e-mail：txue@hsc.pku.edu.cn，通信作者

气候变化已成为21世纪全人类所面对的主要健康挑战之一，具体体现为全球地表温度持续上升，以及气候系统不稳定性的加剧。根据气候变化专门委员会第六次评估报告[1]，2011—2020年全球地表平均温度较工业化前（1850—1900年）已上升约1.09 ℃ [0.95~1.20 ℃]。另外，气候变暖还改变了极端天气的发生规律：20世纪中叶开始，极端高温事件的出现频率与强度都显著增加，高温伴干旱这类复合型事件的发生风险也在不断上升；而极端低温事件出现的绝对次数虽然有所减少，但随着气候波动幅度变大，剧烈的气温起伏易超出人体的生理适应极限，进而给人群健康带来较重的疾病负担。

目前，用于评估气温健康风险的暴露指标涵盖不同时间尺度，类型也较多。本文称之为“多时间尺度气温暴露”，即在不同时间跨度下衡量人体接触外部热环境特征的综合指标体系。根据时间分辨率与潜在作用机制的差异，目前流行病学研究中的暴露指标大致可划分为3类：第一类是短期及急性暴露指标（如小时气温、日平均气温、极端天气事件），常被用于评估心脑血管疾病的急性诱发效应及短期超额死亡；第二类是长期及累积暴露指标（如月/季/年平均气温及累积热暴露），被用于评估长期暴露带来的慢性健康损害，重点反映的是长效应激的积累；第三类是气温波动指标[如气温日较差（daily temperature range, DTR）、气温变异]，可以衡量环境温度的不稳定性对机体造成的应激负担。尽管以上指标分别从不同维度表征了气温变化的健康影响，但当前不同时间尺度的研究多各自独立，缺少系统化的整合框架与内在的逻辑关联。

为解决这个问题，本文系统梳理当前的跨尺度气温暴露指标的健康效应、病理生理机制及应用局限。并在此基础上，提出一种围绕“适应赤字”与“波动风险”的理论分析框架，探讨如何将跨时间尺度的气温影响整合到同一评估体系中，为优化气候健康风险评估、制定科学的适应策略提供方法学的参考。

1 气温短期暴露的健康效应

1.1 气温作为连续变量与非线性效应

虽说一天中的气温会出现一定的波动，不过目前大部分研究还是将日平均气温用于评估短期气温暴露的健康效应[2-3]。在处理大规模公共卫生监测数据时，日平均气温因其与常规公共卫生监测的契合度高，可反映人体全天累积热负荷，是目前暴露评估指标的核心指标。

日平均气温与人群健康结局间的暴露-反应关系（exposure-response function, ERF）呈显著的非线性特征，即U型或J型曲线关联。曲线最低点反应的最低死亡/发病温度代表了人体最适宜的温度区间，其具体数值随地理气候带和人群适应水平的不同而表现出空间异质性[4-5]。全因死亡相关研究的多项大型多中心队列研究结果一致表明：低温对健康影响通常具有明显滞后性与持续性，而高温造成的健康损害则表现得更为急性[2, 6]。在特定病因的分析中，心血管疾病受气温变化影响时的表现符合“急热缓冷”的特征；相比之下，呼吸系统疾病则对低温暴露更敏感，其受极寒天气影响的致死风险及滞后持续时间通常显著高于其他系统[3, 7]。非致死性健康事件的ERF更为复杂，这可能与医疗资源可及性以及疾病发病机制共同作用相关。

在方法学上，目前研究大多采用分布滞后非线性模型作为工具，拟合ERF曲线。该方法以最低死亡/发病温度当作参照标准，将总体的温度相关健康风险分解为热相关风险与冷相关风险，并通过计算归因风险量化健康负担。全球范围的健康负担量化分析显示，目前低温所致的死亡负担(8.52%)远高于高温相关负担（0.91%）[6]。然而，温度对健康影响的分布规律正发生改变。一项预测性研究[8]提示，未来气候变暖虽然会导致低温相关死亡率下降，但该趋势将被人口老龄化带来的影响（主要是人群敏感性的上升）抵消，最终温度相关总死亡率可能不降反升。

1.2 气温作为分类变量：极端高温/热浪

在全球气候持续变暖的背景下，极端高温事件（热浪）频发且波及地区越来越广，已成为重要的公共卫生威胁[9]。流行病学研究[10-11]表明，热浪暴露带来的健康损害具有一定的急性特征，与其相关的超额死亡或急诊峰值往往在暴露当天及随后的1~3 d内显现，留给公共卫生系统的响应窗口极短。

热浪引发的急性健康损伤，源于体温调节中枢代偿失调引发的级联反应导致的。当外界环境温度超出皮肤表面温度，人体核心体温的快速升高不仅会直接诱发热射病及全身性炎症反应综合征[12]，还会对心脑血管系统造成显著的急性负荷。为了维持体表散热，心输出量代偿性增加，往往会诱发脆弱人群的心肌缺血[13]；高温环境下，因大量出汗引起的血容量大幅减少、血液浓缩及高凝状态，也同样会显著提升缺血性脑卒中及急性冠脉综合征的发生风险[3]。此外，热浪的健康风险在城市空间内呈现出显著的异质性。居住于高密度城区的老年人，以及缺乏有效防护的劳动年龄人群[14]，因承受了严峻的局部微气候暴露，面临着更高的极端热风险[15]。

在实际的大气环境中，热浪暴露常非孤立发生。高温往往伴随静稳天气，容易导致气溶胶与光化学污染物积聚，从而形成“热–湿–污”的复合环境暴露。相关研究[16-17]显示，持续高温和空气污染物会产生协同作用，可进一步加重$PM_{2.5}$与臭氧对心肺系统的损害。国内相关评估[18]证实，高相对湿度对热浪及寒潮的严重影响程度均存在显著的放大效应。未来应该更多使用如湿球黑球温度等综合指标，全面评估“湿热”复合型暴露的健康效应。

1.3　气温作为分类变量：极端低温/寒潮

虽然极端高温事件是当前的研究热点，不过在与温度相关的全球疾病负担中，寒冷暴露的健康影响占比仍然较高。全球疾病负担分析[19]显示，寒潮的发生频率在过去20年间呈下降趋势，但其导致的死亡负担依然沉重：2000—2019年，每年约有20.6万例超额死亡与寒潮直接相关，其数量规模高于热浪。相较于热浪的发作快、影响直接的特点，寒潮对健康的损害表现出显著的滞后性与持续性[2]。

寒潮造成的系统性损伤主要集中在心脑血管与呼吸系统。在心血管方面，冷应激可促使交感神经兴奋与外周血管广泛收缩，在显著增加心脏后负荷的同时，引发血小板聚集及血液高凝状态，进而显著增加斑块破裂与血栓形成的风险[20]。Meta分析[21]表明，寒潮期间中国人群心血管疾病死亡风险平均增加36%，而老年人由于自身体温调节能力减退而表现出更高的易感性。在呼吸系统方面，吸入干冷空气易导致气道黏膜失水、渗透压失衡及上皮屏障受损等问题[22]，进而引发急性气道炎症或加重慢性阻塞性肺疾病。

1.4　小时尺度的健康效应

日平均气温指标由于时间分辨率的局限，易掩盖日内气温波动状况，可能低估短时间内温度骤变对人体健康的急性影响。近年来，得益于高分辨率气象同化数据与电子病历系统的联合应用，气温健康效应研究的时间尺度正逐步突破“日层面”，细化至“亚日/小时尺度”。

一项基于急性缺血性卒中发病的全国性病例交叉队列研究[23]发现，小时尺度气温升高与脑卒中发病风险呈显著正相关，风险在暴露当小时内即达峰值，且高风险窗口期不足半日。此外，苏州的一项研究[24]显示，温度短时间内的突然变化（0~5 h）可迅速打破人体的血流动力学稳态，导致收缩压与舒张压出现U型波动，这种剧烈的血压变化或许是诱发心脑血管急症的关键原因。以上研究共同表明，小时级的气象指标在识别超短期健康效应方面具有更高的灵敏度。

总体而言，气温短期暴露的健康效应是目前环境流行病学中研究证据最为丰富的领域。

2　气温长期暴露的健康效应

2.1　长期平均气温与累积热暴露

在评估气候变化对人类健康的长期影响时，年/季平均气温是测量气温慢性暴露的关键指标，其与健康结局之间通常呈现较为复杂的关联。基于全国范围的大型空间流行病学研究，长期气候变化已被证实会给人类健康产生显著危害。通过准实验设计与双重差分模型，研究[25]发现年均气温的长期偏移（基准线升或降1°C）均会显著增加人群全因死亡率，并且在特定区域表现出明显的空间异质性[26]。

相较于静态的平均气温指标，以“度日”或“度小时”量化的累积热暴露正成为衡量长效热负荷的重要补充。前瞻性队列研究[27]结果显示，长期高水平的热暴露是中年人群冠状动脉钙化进展的独立危险因素；对于呼吸系统，全生命周期（尤其是关键发育期窗口）的夏季累积热暴露，可能会使得成年后肺功能关键参数的下降[28]。提示

长期异常热暴露不仅会产生累积性健康损害，其跨生命周期的远期健康影响同样不容忽视。

2.2 长期居住于极端环境的慢性效应

长期生活在极端气候区的人群，其生理系统在长期的环境压力下会发生适应性改变，形成与当地环境匹配的温度耐受性。相关研究[29]表明，人群的热适应存在显著的地域差异：南方常住居民的热敏感阈值普遍高于北方，表现出对长期热环境的热习服。不过长效热负荷依然是一种慢性应激源，会持续损害人群健康。例如，热带/亚热带地区的长期夜间高温会严重影响睡眠质量，进而增加认知功能下降与神经精神疾病的风险，这种效应在缺乏物理降温条件的老年人群中尤为明显[30-31]。同样，高寒或高海拔地区的持续低温也会对心血管与代谢系统造成长期慢性负荷。研究[32]证实，常年偏低的基线温度与缺血性心脑血管事件的远期死亡率之间存在显著的正相关，其机制在于持续低温会不断激活肾素-血管紧张素系统，使得外周血管长期处于高张力状态[33]。

2.3 中尺度（周-月）气温暴露的健康效应

尽管高频气象数据的应用日益普及，基于周或月尺度的气温暴露评估在环境流行病学研究中仍具有重要价值。相关研究的价值主要体现在两方面：一是受限于历史数据可得性，许多地区仅能提供按周或按月聚合的卫生统计数据，或者疾病监测系统本身就以周/月为报告单位；二是对于具有明确生理周期的健康结局（如妊娠周期和胚胎发育），周尺度的气温暴露更能准确匹配对应的生理敏感窗口。

在慢病与全因死亡评估中，早期基于周/月度数据的时间序列分析证实了极端气温（尤其是寒冷月份）对老年人群死亡风险的累积损害。此外，周/月尺度的极端气温变化对特定系统疾病的发生同样具有重要预警意义。例如，一项中国的多城市研究[34]发现，周均气温异常波动与神经系统疾病相关死亡间存在显著关联。

生殖与围产医学是普遍应用周尺度气温评估的一个领域。以“孕周”为时间单位，研究者能够精准比较不同妊娠阶段对气温暴露的敏感性差异。现有证据[35]表明，气温暴露的致病窗口表现出明显的阶段特性：在胚胎器官分化发育的关键时期，周尺度的极端高温会显著增加新生儿先天性心脏病的发病风险；而在妊娠晚期（尤其是产前最后4周）暴露于高温，则容易诱发母体急性应激或改变胎盘微环境，导致早产风险显著上升[36]。

综合来看，气温中长尺度暴露的研究揭示了气候变化更为隐蔽的慢性健康负担。与短期暴露引发的急性失代偿不同，长期的平均气温偏移或异常热量的持续蓄积，其危害更多体现在特定靶器官的进行性损伤。周尺度的暴露在生殖与围产医学中应用广泛，能较好地匹配妊娠周期，识别气温危害的生理敏感窗口。

3 温度波动的健康效应

3.1 日内波动指标

DTR作为反映单日内气温变化幅度的指标，可一定程度上弥补使用日平均气温指标的局限。作为评估全球气候变暖与城市热岛效应的核心指标，DTR既能体现短时间内气温的不稳定性，也能展示单日内的冷热交替状态。大量流行病学证据表明，DTR是独立于绝对气温的危险因素，其异常增大不仅会引发急性的健康损害，更对人群心脑血管具有长期慢性累积危害。例如，一项覆盖全国的前瞻性队列研究[37]显示，长期暴露于较大日内温差环境中，居民心脑血管疾病的远期发病率将显著增加9%~13%。

人体对DTR的耐受性表现出明显的非线性特征。以脑卒中为例，其暴露反应关系存在明确的U型拐点，当某天DTR超过10 °C的生理代偿极限时，剧烈的血管收缩舒张负荷导致发病风险呈非线性快速上升。此外，一项研究[38]采用准实验设计，在宏观层面验证了上述关联，并提到部分气候脆弱区域在面临长期DTR异动时，承受着更沉重的健康压力。

3.2 日间（短期）波动指标

相邻日间的气温变异是评估气候健康效应的另一个暴露指标，气温变异（通常以特定时间窗内日均温的标准差衡量）主要反映了短期内气温的剧烈波动。区别于热浪/寒潮的持续性高温/低温应激，气温变异对人体的健康损害主要源于气温大幅波动加重体温调节中枢负担增加，使得代

偿功能受损乃至衰竭[39]。国内基于多维温度变异指标的研究[40]进一步指出，若综合考量温度变化的幅度与方向，这种剧烈起伏对居民寿命损失年等宏观疾病负担的损害尤为沉重。在全球气候不稳定性加剧的背景下，人群不仅面临长期基线温度升高的慢性影响，同时还需应对日间气温波动带来的双重生理压力。

短期气温变异对健康的负面影响已被全球多个地区的流行病学研究[41−42]证实。一项覆盖 43 个国家的大规模时间序列研究[41]指出，全球约 1.75% 的超额全因死亡可归因于短期气温变异。这一量级的健康风险在东亚地区的队列研究[42]中也得到了验证，且该研究还发现气温变异对心血管和呼吸系统疾病的影响尤为显著。

3.3　季节/年度气温波动（中长期波动指标）

除开监测短期气温变动的指标外，以季节或年度气温的标准差为代表的中长期气温波动指标，是衡量长期气候不稳定状况的重要依据。相较于气温变异，标准差旨在展现特定较长周期内（如整个暖、冷季）气温分布的整体离散程度，代表区域长期的气候波动特征。

流行病学相关研究[43]发现，长期的气候不稳定本身就是一种独立的健康威胁。这种健康影响在另一项美国全国性研究中得到了进一步的因果推断支持：研究通过双重差分模型，发现暖季与冷季气温的标准差每升高 1 单位可分别造成 1.54% 与 0.69% 的超额死亡；而单纯的季节均温变化在该模型中差异无统计学意义。此外，长期的气温波动对人体特定系统的慢性损伤同样不容忽视。长期暴露于高气温标准差的环境中，会显著增加老年人因痴呆住院的风险。

综上所述，温度波动相关健康效应的研究确立了“气温不稳定性”作为独立环境危险因素的地位。从反映单日内冷热交替的 DTR、衡量短期气温起伏的日间气温变异，再到体现长周期气候波动的标准差，当前研究已涵盖了短、中、长多个周期。这一系列指标的共同致病核心在于，快速的气温变化加重了人体自主神经与体温调节中枢的代偿负担。在气候变化的背景下，全球变暖伴随的异常温度波动已然构成了不可忽视的人群健康威胁。

4　不同尺度指标效应的潜在关联与展望

4.1　暴露指标的多样性与碎片化现状

气温健康效应相关研究中应用的暴露指标覆盖多时间分辨率。无论是衡量短期变化的小时级温度或日间变异，还是反映长期气候背景的年/季均温波动，这些指标在统计构造上虽然存在差异，但其在病理学层面的核心目的大体相同——即去评估外部热环境变化超出人体体温调节代偿阈值的时间与强度。

不过，这种评估指标的多样性也在一定程度上导致现有研究难以形成系统性的整合。在现行评估框架下，不同时间尺度的暴露常被分割讨论。例如，短期气温变化造成的急性健康损害与长期气温暴露造成的慢性负担，通常被孤立地研究。跨时间尺度评估的缺失，让学界无法系统说明长期气候变暖是如何加剧极端天气危害的；也难以解释“长期适应炎热气候的人群在面对极端热浪时仍表现出高易感性”等科学的问题。因此，突破单一时间尺度的研究局限，构建综合考量长期气候变化与短期气象波动的联合风险评估方法，是今后环境流行病学研究需要关注的重点方向。

4.2　跨尺度健康效应的联系：以“适应赤字”与“波动风险”理论框架为例

针对上述不同时间尺度指标间相互脱节的情况，结合非线性 ERF 的数学特征，尝试引入一套基于泰勒级数展开的跨尺度风险评估框架（图 1）。该框架从数学层面上搭建了“由短期至长期”跨尺度评估的桥梁，将抽象的统计参数转化为具有明确物理意义的流行病学机制。

假设 $M(T)$ 代表某一地区在日气温为 T 时的超额相对风险，将 $M(T)$ 围绕该地区长期的平均

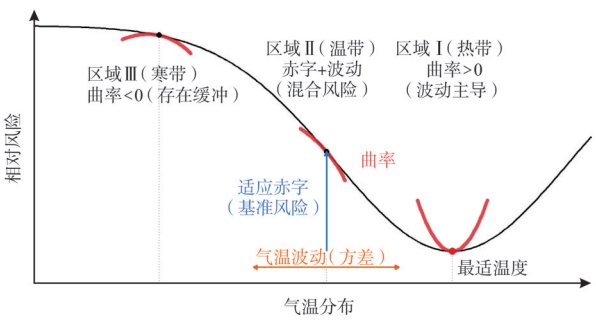

图 1　温度变化相关的健康风险的机械化解构框架

气温（记为 $\bar{T}$）进行二阶泰勒展开，随后对该地区全年的日平均气温分布求期望值 $E[M(T)]$。由于气温偏离均值的期望值为零（$E[T-\bar{T}]=0$），一阶导数项可被消除。最终，人群的预期健康风险（$E[\mathrm{Risk}]$）可拆解为两个彼此独立又内在关联的两部分：

$$E[\mathrm{Risk}]\approx \underbrace{M(\bar{T})}_{\text{适应赤字}}+\underbrace{\frac{1}{2}M''(\bar{T})\cdot E[T-\bar{T}]^2}_{\text{波动风险}}。$$

（1）适应赤字，即公式中的 $M(\bar{T})$。它代表了长期平均气温偏离人群的最适宜温度而产生的固有健康负担，具体数值为长期平均气温处的相对风险（$RR[\bar{T}]$）。这一部分本质上反映了“人群长期热适应水平”与“其实际生存的平均环境”之间的根本性错配。传统气候变化模型中由“均值升高”导致的风险即归于此项。

（2）波动风险，它捕捉了由气温不稳定性驱动的风险累积。在数学上，它是 ERF 在长期平均温度处的局部曲率 $M''(\bar{T})$ 与当地气温方差 $E[T-\bar{T}]^2$ 的乘积。这一项可以解释气温变异或气温的标准差等波动指标的致病原理——在相同平均气温下，气温波动幅度的扩大将通过非线性ERF的“凸面效应”，对人体健康造成额外损伤。

基于该解析框架，可以将全球不同气候带面临的健康风险划分为3种典型的区域（对应图 1）：区域Ⅰ（热带-波动主导）代表长期平均气温接近人群最适宜温度的地区，虽然其“适应赤字”极低，但该区域处于ERF的谷底并呈现陡峭的正向凸性（曲率 M'' 很大），导致人群对短期气温起伏极为敏感，微小的波动即可引发健康风险的非线性激增；区域Ⅱ（温带-混合风险）代表过渡性气候区，其长期平均气温距离最适宜温度有一定偏离，生活在此处的人群面临着“双重风险”，即不仅要承受一定的慢性“适应赤字”，同时因曲线仍具备正向曲率，还需承受气温波动带来的额外健康惩罚；区域Ⅲ（寒带-赤字主导）代表长期均温远离 最适宜温度的极端气候区域，在此处风险曲线逐渐饱和甚至向下弯曲呈凹形（曲率 $M''<0$），即气温的波动能够部分抵消死亡负担，对严酷的基线气候起到一定的保护性“缓冲”效应。

这一理论框架揭示了不同时间尺度指标间的内在数学联系：长期的健康风险，实际上是短期非线性效应在当地气温分布下的期望积分。“长期平均气温”与“气温波动”并非相互独立，而是共同决定整体健康负担的两个方面。该框架将平均气温的短期与长期风险用理论联系起来，为全面评估气候变化健康风险提供了一个新的方法学视角。

4.3 未来展望：推进“跨尺度效应分析”的方法学建议

未来的研究应逐步突破单一时间尺度的局限，朝着“跨尺度效应整合”的体系迈进。为了评估气温-健康的复杂关联，对后续研究的方法学设计提出以下建议。

（1）在统计建模与机制分析方面，未来研究应从单一暴露指标的分析向多指标联合评估的模型转变。将“长期气候背景”与“短期气温波动”同时纳入模型的意义在于：一是可以控制不同时间尺度的混杂偏倚，更准确地估计各自的健康风险；二是有助于探讨跨尺度指标间的交互作用。比如，可以定量评估人群长期的气候适应水平在短期极端天气事件中，发挥怎样的调节作用。这类联合评估能帮助我们理清机体从短期急性应激向长期慢性适应转变的动态生理过程。

（2）随着高精度气象数据与个体健康数据的可及性提升，暴露评估应从基于区域静态均值向“个体动态暴露”转变。后续的跨尺度分析需要将人群的时空活动规律纳入考量，而不是单单考虑个体居住地的气候条件。多源高分辨率数据的整合利用，能够提高风险评估的精准度，为制定针对性的气候适应与健康干预策略给出科学参考。

利益冲突声明 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 刘恒毅：文献调研与整理、起草论文、修订论文；薛 涛：提出综述主题和研究问题、设计框架、审核论文、修订论文。

参考文献

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022-impacts, adaptation and vulnerability: Working Group Ⅱ Contribution to the Sixth Assessment Report

of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.

[2] GASPARRINI A, GUO Y M, HASHIZUME M, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study[J]. The lancet, 2015, 386(9991): 369-375.

[3] CHEN R J, YIN P, WANG L J, et al. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities[J]. Bmj, 2018: k4306.

[4] YIN Q, WANG J F, REN Z P, et al. Mapping the increased minimum mortality temperatures in the context of global climate change[J]. Nature communications, 2019, 10: 4640.

[5] FOLKERTS M A, BRÖDE P, WOUTER BOTZEN W J, et al. Long term adaptation to heat stress: shifts in the minimum mortality temperature in the Netherlands[J]. Frontiers in physiology, 2020, 11: 225.

[6] ZHAO Q, GUO Y M, YE T T, et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: A three-stage modelling study[J]. The lancet planetary health, 2021, 5(7): e415-e425.

[7] 于洋，郑浩，费娟，等. 2017—2019年南京市极端气温对人群非意外死亡风险影响研究[J]. 环境与健康杂志，2023，40(2)：140-145.

[8] BAKHTSIYARAVA M, KEPHART J L, SÁNCHEZ B N, et al. Future temperature-related mortality in Latin American cities under climate change and population scenarios[J]. Environment international, 2025, 202: 109694.

[9] ROMANELLO M, WALAWENDER M, HSU S C, et al. the 2024 report of the lancet countdown on health and climate change: facing record-breaking threats from delayed action[J]. Lancet (London, England), 2024, 404(10465): 1847-1896.

[10] ZHAO Q, LI S S, YE T T, et al. Global, regional, and national burden of heatwave-related mortality from 1990 to 2019: a three-stage modelling study[J]. PLoS medicine, 2024, 21(5): e1004364.

[11] 赵浩，周宝峰，刘策，等. 极端温度对中毒住院风险影响的病例交叉研究[J]. 兰州大学学报(医学版)，2025，51(11)：36-43.

[12] EBI K L, CAPON A, BERRY P, et al. Hot weather and heat extremes: health risks[J]. The lancet, 2021, 398(10301): 698-708.

[13] CHASELING GK, UCHMANOWICZ I, BÄCK M, et al. Heat extremes and cardiovascular diseases: a scientific statement of the Association of Cardiovascular Nursing & Allied Professions, Association for Acute Cardiovascular Care, European Association of Preventive Cardiology, Heart Failure Association, European Heart Rhythm Association of the ESC, the ESC Council on Hypertension, the ESC Council on Stroke, and the ESC Working Group on Cardiovascular Pharmacotherapy[J]. European heart journal, 2025, 46(30): 2950-2958.

[14] LI Y N, VARGHESE B M, ANIKEEVA O, et al. The impact of high temperatures and heatwaves on health outcomes among working-age adults (15-64 years): a systematic review and meta-analysis[J]. Environment international, 2026, 208: 110142.

[15] 陈星，姜紫莹，方澜. 超大城市高温热浪脆弱性评价及应对策略——以上海市为例[J]. 上海城市规划，2025，(06)：124-131.

[16] BALDWIN J W, BENMARHNIA T, EBI K L, et al. Humidity's role in heat-related health outcomes: a heated debate[J]. Environmental health perspectives, 2023, 131(5): 055001.

[17] 朱毅翔，阚海东. 大气环境影响人群健康的研究进展与展望[J]. 兰州大学学报(医学版)，2025，51(1)：1-11，25.

[18] 孟长青，刘柯莹，钟德钰，等. 高相对湿度对热浪及寒潮事件的放大效应评估——以嘉陵江流域为例[J]. 水力发电学报，2023，42(4)：11-24.

[19] GAO Y, HUANG W Z, ZHAO Q, et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with cold spells during 2000-19: a three-stage modelling study[J]. The lancet planetary health, 2024, 8(2): e108-e116.

[20] CASTELLANI J W, YOUNG A J. Human physiological responses to cold exposure: acute responses and acclimatization to prolonged exposure[J]. Autonomic neuroscience, 2016, 196: 63-74.

[21] 陈仁超，杨军，李碧霞，等. 寒潮对我国人群死亡影响的Meta分析[J]. 环境与健康杂志，2019，36(12)：1068-1073.

[22] D'AMATO M, MOLINO A, CALABRESE G, et al. The impact of cold on the respiratory tract and its consequences to respiratory health[J]. Clinical and translational allergy, 2018, 8(1): 20.

[23] ZHU X L, CHEN R J, YUAN J, et al. Hourly heat exposure and acute ischemic stroke [J]. JAMA network open, 2024, 7(2): e240627.

[24] XU D D, ZHANG Y, WANG B, et al. Acute effects of temperature exposure on blood pressure: an hourly level panel study [J]. Environment international, 2019, 124: 493-500.

[25] HU J X, ZHOU M G, QIN M F, et al. Long-term exposure to ambient temperature and mortality risk in China: a nationwide study using the difference-in-differences design [J]. Environmental pollution, 2022, 292: 118392.

[26] AI S Q, LU H, LIU H Y, et al. All-cause mortality attributable to long-term changes in mean temperature and diurnal temperature variation in China: a nationwide quasi-experimental study [J]. Environmental research letters, 2024, 19(1): 014002.

[27] ZHAO D D, YAO J, LI Y F, et al. Associations of long-term exposure to temperature with coronary artery calcification risk among middle-aged adults: the Coronary Artery Risk Development in Young Adults (CARDIA) study [J]. Science of the total environment, 2025, 966: 178675.

[28] MIAO J M, FENG S R, WANG M H, et al. Life-time summer heat exposure and lung function in young adults: a retrospective cohort study in Shandong China [J]. Environment international, 2022, 160: 107058.

[29] WANG Y, LIU Y, YE D X, et al. High temperatures and emergency department visits in 18 sites with different climatic characteristics in China: risk assessment and attributable fraction identification [J]. Environment international, 2020, 136: 105486.

[30] MINOR K, BJERRE-NIELSEN A, JONASDOTTIR S S, et al. Rising temperatures erode human sleep globally [J]. One earth, 2022, 5(5): 534-549.

[31] OBRADOVICH N, MIGLIORINI R, PAULUS M P, et al. Empirical evidence of mental health risks posed by climate change [J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2018, 115(43): 10953-10958.

[32] Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of europe [J]. The Lancet, 1997, 349(9062): 1341-1346.

[33] 吴春丽, 李娟, 王晶, 等. 寒冷地区原发性高血压患者肾素水平与危险因素探讨[J]. 微量元素与健康研究, 2020, 37(6): 24-26

[34] SU X M, SONG H J, CHENG Y B, et al. The mortality burden of nervous system diseases attributed to ambient temperature: a multi-city study in China [J]. Science of the total environment, 2021, 800: 149548.

[35] XU W Z, LI D, SHAO Z H, et al. The prenatal weekly temperature exposure and neonatal congenital heart disease: a large population-based observational study in China [J]. Environmental science and pollution research, 2023, 30(13): 38282-38291.

[36] HE J R, LIU Y, XIA X Y, et al. Ambient temperature and the risk of preterm birth in Guangzhou, China (2001-2011) [J]. Environmental health perspectives, 2016, 124(7): 1100-1106.

[37] TANG H S, WANG X, KANG Y T, et al. Long-term impacts of diurnal temperature range on mortality and cardiovascular disease: a nationwide prospective cohort study [J]. Metabolites, 2022, 12(12): 1287.

[38] GUO Y M, GASPARRINI A, ARMSTRONG B G, et al. Temperature variability and mortality: a multi-country study [J]. Environmental health perspectives, 2016, 124(10): 1554-1559.

[39] 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.

[40] WU Y, LI S S, ZHAO Q, et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with short-term temperature variability from 2000-19: A three-stage modelling study [J]. The Lancet. Planetary Health, 2022, 6(5): e410-e421.

[41] LIU J M, DU X H, YIN P, et al. Cause-specific mortality and burden attributable to temperature variability in China [J]. Science of the total environment, 2023, 896: 165267.

[42] HEALY J P, DANESH YAZDI M, WEI Y G, et al. Seasonal temperature variability and mortality in the medicare population [J]. Environmental health perspectives, 2023, 131(7): 077002.

[43] WEI Y G, WANG Y, LIN C K, et al. Associations between seasonal temperature and dementia-associated hospitalizations in New England [J]. Environment international, 2019, 126: 228-233.

(责任编辑: 王春燕)