

# 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价 ——研究进展与框架

谢盼,王仰麟,彭建,刘焱序

(北京大学城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

**摘要:**随着全球气候变化和城市热岛效应增强,近年来城市高温热浪灾害在世界各地频繁发生,给城市居民健康和社会经济带来了极大的负面影响。目前,国内已有的高温热浪灾害研究大多关注热浪强度、发生频率、持续时间等灾害特征,以城市居民健康作为承灾体的城市高温热浪灾害脆弱性研究尚不多见,相关的评价框架和方法亟待梳理和完善。本文从高温热浪灾害脆弱性的研究主题、脆弱性框架和定量化方法三个方面系统梳理了高温热浪灾害脆弱性国内外研究进展;在广义脆弱性概念框架的基础上完善了基于“暴露—敏感—适应能力”的高温热浪灾害脆弱性评价概念框架,并梳理了相应的指标体系;强调通过自然环境、社会经济、居民感知等多角度的定性、定量数据综合表征城市居民高温热浪灾害脆弱性,以期在高温热浪灾害脆弱性评价提供理论与方法支持,并为规避高温热浪灾害风险、响应高温热浪紧急事件及适应气候变化等提供科学指引。

**关键词:**城市高温热浪灾害;脆弱性评价;居民健康;适应能力

## 1 引言

城市是人类最主要的栖息地,城市化已成为20世纪以来人类社会发展的最显著特征(Platt, 1994)。随着城市化进程的加速推进,城市高温热浪、暴雨内涝、雾霾污染等自然灾害给城市居民健康以及城市可持续发展带来了严峻考验。作为城市地域自然灾害的重要类型,高温热浪灾害在20世纪末已经极为严峻,未来还将在发生强度、发生频率以及持续时间上明显增强(IPCC, 2007)。因此,高温热浪灾害已成为当前城市自然灾害研究的热点领域之一(秦大河, 2014; 郑景云等, 2014)。

高温热浪指持续多天的高温天气,由于研究方向和区域的不同,目前国际上对于高温热浪还没有一个广泛认同的标准定义。例如,世界气象组织(WMO)建议将日高温高于32℃且持续3天以上的天气过程称为高温热浪;荷兰皇家气象研究所认为热浪为一段最高温度高于25℃且持续5天以上(其

中至少有3天高于30℃)的天气过程;中国气象局则规定日高温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、连续3天以上的高温天气称为高温热浪,但由于中国幅员辽阔、气候差异大,各省市可根据本地气候特征规定临界温度值。近20年来,城市高温热浪灾害给全球居民健康带来了极大负面影响。1995年7月,芝加哥热浪事件导致700多人死亡(Semenza et al, 1996);2003年夏季,欧洲高温热浪事件中有35000人被夺去生命(Stott et al, 2004);2010年夏季中国西安的高温死亡病例比上年增长54%(张楠等, 2011)。除了直接导致死亡外,高温天气下心血管、呼吸道、消化道等疾病的发病率都会显著增加(Semenza et al, 1996)。此外,高温天气还会加重云、雾、有害气体及烟尘在城市上空的积累,造成气象灾害,进一步威胁城市居民健康(Patz et al, 2005)。由此可见,高温热浪灾害对人体健康造成的威胁不容忽视,特别是在未来高温热浪灾害频率、强度及持续时间不断增强的趋势下,高温热浪灾害对人体健康影响的评价与预测应

收稿日期:2014-11;修订日期:2015-01。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41330747)。

作者简介:谢盼(1989-),女,湖北赤壁人,硕士研究生,研究方向为综合自然地理与景观生态,E-mail: xiepan1234@gmail.com。

通讯作者:王仰麟(1963-),男,陕西合阳人,教授,博导,主要从事景观生态与土地利用研究,E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn。

引用格式:谢盼,王仰麟,彭建,等. 2015. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价: 研究进展与框架[J]. 地理科学进展, 34(2): 165-174.  
[Xie P, Wang Y L, Peng J, et al. 2015. Health related urban heat wave vulnerability assessment: research progress and framework[J]. Progress in Geography, 34(2): 165-174. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.02.005]

予以足够重视。

脆弱性是指系统容易受到影响或无法对抗伤害、破坏或危害的程度(IPCC, 2001)。脆弱性的概念最早出现在自然灾害研究领域(Janssen et al, 2006),目前已扩展到生态学、经济学、公共健康及气候变化等众多领域(陈萍等, 2010; 李鹤等, 2011; 喻鸥等, 2011; 王岩等, 2013)。从灾害学的角度来看,脆弱性指承灾体受到自然灾害冲击时的易损程度,由一系列自然、社会、经济因素及其相互作用过程决定(Pelling, 2004)。脆弱性评价则能够帮助识别脆弱人群分布的空间差异,使得决策者能够更有针对性地配置救灾物资、实施防灾减灾措施(Frazier et al, 2014)。相应地,高温热浪灾害研究也可借助脆弱性理论体系,开展基于居民健康的高温热浪灾害脆弱性评价工作,从而达到高温热浪灾害脆弱人群识别、健康风险规避的目的。由于城市生态系统稳定性不高,面对灾害和干扰时自身抵抗能力、调节能力较差,同时城市又是人类社会、经济和文化聚集的中心,一旦遭到外界干扰将会造成较大的社会经济损失(彭建等, 2014),因此,开展城市高温热浪灾害脆弱性评价对于城市地域可持续发展具有重要意义。

本文将从研究主题、脆弱性框架和量化方法3个方面系统梳理高温热浪灾害脆弱性评价研究进展,在广义脆弱性评价框架基础上完善基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价概念框架,并梳理相应的具体指标体系,以期为城市高温热浪灾害脆弱性评价提供方法论支撑。

## 2 城市高温热浪灾害脆弱性研究进展

### 2.1 研究主题

中国早期高温热浪灾害研究主要基于气象数据,从气象学或灾害学角度探讨高温热浪的成因及其时空分布特征(苗爱梅等, 2011; 郑有飞等, 2012);这些研究大多考虑灾害强度、发生频率、持续时间等高温热浪灾害特征,缺乏高温热浪灾害对于居民健康、社会经济、环境影响的综合分析;同时,基于气象资料的研究结果往往难以进行空间制图,不利于针对性的高温热浪灾害空间预警。相比高温热浪成因与分布研究而言,关注居民健康的高温热浪灾害脆弱性研究时间较短,特别在国内,相关的理论方法和个案研究都较为少见。相对而言,国外较

早开始探讨高温热浪灾害和居民健康之间的关系,在过去几十年中已从单纯地考虑高温热浪灾害危害性发展到涵盖自然环境、社会经济状况、资源可得性等的脆弱性探讨(Eakin et al, 2006)。其中,早期研究主要关注高温热浪和居民健康二者之间的联系,侧重于病理方面研究,如对人体健康产生不良后果的温度阈值研究,发病率/死亡率与个体性别、年龄、病史、经济状况的关系探讨等(Semenza et al, 1996; Hajat et al, 2006)。

近年来,随着国际上对于可持续性科学和脆弱性概念的高度关注,高温热浪灾害对人体健康影响逐渐被纳入到脆弱性评价中,从自然环境、人口特征、社会经济等方面构建脆弱性评价综合指标体系,实现对区域高温热浪灾害脆弱性的定量表征,从而达到对脆弱人群的空间识别(Uejio et al, 2011; Johnson et al, 2012)。目前,高温热浪灾害脆弱性研究热点为脆弱性的定量表征,主要包括利用空间化的自然环境、社会经济数据衡量城市内部高温热浪灾害脆弱性的空间差异,进而识别脆弱性热点区(Reid et al, 2009; Rinner et al, 2010; Harlan et al, 2012),构建高温热浪灾害脆弱性评价模型,并基于历史高温热浪灾害致病/致死率数据进行模型精度验证(Uejio et al, 2011; Johnson et al, 2012)。高温热浪灾害脆弱性研究并不仅仅限于脆弱性制图和定量模型构建,学者们近年来在脆弱性的情景预测、尺度拓展、指标关联、不确定分析等方面都开展了有益的尝试。例如,Vescovi等(2005)在现状高温灾害脆弱性制图的基础上,结合IPCC气候变化情景对2039-2063年魁北克高温热浪灾害的未来情景进行了预测;Johnson等(2012)基于更为精细的社区邻里尺度,建立了高温热浪灾害脆弱性评价模型;而Reid等(2009)重点探讨了高温热浪灾害脆弱性各影响指标之间的关系及其与脆弱性整体的关联;El-Zein等(2015)则从脆弱性认知、模型、指标及方法等方面对高温热浪灾害脆弱性研究的不确定性进行了系统探讨。

### 2.2 脆弱性框架

遵循广义脆弱性研究从仅考虑自然环境因素到综合关注环境因素、社会经济因素的转变(Eakin et al, 2006),高温灾害脆弱性研究框架开始综合考虑灾害暴露以及受灾体的社会经济特征。例如,Vescovi等(2005)将高温灾害脆弱性定义为灾害暴露与社会脆弱性共同作用的结果,提取温度高于



35℃的天数来刻画高温热浪灾害暴露,结合社会经济脆弱性(主要采用年龄、贫困、社会隔离、教育程度等指标)对高温热浪灾害脆弱性进行评价;Aubrecht等(2013)利用气象站点插值数据提取高温热浪灾害信息,结合人口统计数据(老年人口)、社会经济数据(独居、贫穷、语言、教育)和土地利用数据,定量评价华盛顿高温热浪灾害脆弱性。但是,上述研究均仅将高温暴露和人群敏感性纳入考虑,而忽视了对人群适应能力的考量。

将适应能力纳入脆弱性评价框架以及适应能力的量化表征,已经成为当前脆弱性评价研究的重要趋势。IPCC第四次会议指出了适应能力在气候变化脆弱性评价中的重要性,并在第五次报告中进一步强调了从适应能力角度出发为政府决策人员提供灾害减缓措施的必要性(IPCC, 2007; IPCC, 2014);同时,已有学者在高温热浪灾害和人类健康的耦合研究(Klinenberg, 2003)以及广义社会脆弱性研究(Leichenko et al, 2009)中,尝试将适应能力纳入评价准则。在高温热浪灾害脆弱性研究中,也有学者逐渐开始尝试将适应能力纳入研究框架,将暴露、敏感性和适应能力三者作为一个统一整体,构建高温热浪灾害脆弱性评价模型,并对脆弱性量化方法进行了积极探索(Wolf et al, 2013; Zhu et al, 2014; El-Zein et al, 2015)。

与之相对,亦有一些研究认为脆弱性是敏感性和适应能力二者综合作用的结果,而将暴露单独剥离出来。IPCC就将脆弱性定义为由于人群特征(敏感性)以及应对灾害或从灾害中恢复的能力(适应能力)不足所带来的负面影响(IPCC, 2007)。此外,较有代表性的则是Cutter等(2003)提出的自然灾害社会经济脆弱性模型(Social Vulnerability Index, SoVI),综合考虑居民年龄、性别、种族、教育、职业、家庭结构,以及区域基础设施、社会经济发展状况等因素,来衡量自然灾害的社会经济脆弱性。而作为自然灾害的一种类型,高温热浪灾害的脆弱性评价模型近年来也有学者对暴露未予考虑。例如,Reid等(2009)考虑人口特征(包括经济状况、教育程度、种族、独居老人等因素)、土地利用、疾病及空调可得性等,开展了美国高温热浪灾害脆弱性制图;Maier等(2014)利用改进的Reid模型,结合人口数据、土地利用数据和疾病数据,评估了美国佐治亚州高温热浪灾害脆弱性。需要说明的是,上述脆弱性界定对于包含敏感性和适应能力的社会经济

脆弱性分析较有帮助,但对于强调防灾减灾策略的自然灾害脆弱性评价与管理则表现出较大的局限性。

### 2.3 量化方法

高温热浪灾害脆弱性的定量评价包括指标选取(indicator selection)、指标确权(indicator weighting)与指标综合(data aggregation)3个具体步骤。由于高温热浪灾害脆弱性评价往往涉及到环境变量、社会经济变量等多元要素,指标选取应该保证其准确性和区域代表性。目前,指标确权的常用方法主要包括图层叠置法、主成分分析法和多准则决策法。其中,图层叠置法是指将各种影响高温热浪灾害脆弱性的指标权重设为相等,直接在GIS中图层叠加得到脆弱性空间分布。例如,Vescovi等(2005)将表征社会经济脆弱性的4个指标(年龄、贫困、社会隔离、教育程度)归一化后在GIS中直接等权叠加,得到加拿大魁北克市社会经济脆弱性空间分异;Aubrecht等(2013)在对华盛顿高温热浪灾害脆弱性的研究中构建了高温脆弱性指数,将各种影响指标归一化到[0,1],然后等权叠加。图层叠置法往往简单易行,在揭示脆弱性空间格局、识别脆弱性热点区域方面具有明显优势;但是由于指标等权设置,该方法不能表征各指标对于整体脆弱性影响程度的差异,很难反映出脆弱性的主要影响因素,对于整体脆弱性减缓途径的指示意义不大(李鹤等, 2008)。

主成分分析是一种适用于多变量的降维方法,通过梳理各指标之间的关系,能够在尽可能保有原始数据信息的基础上进行数据降维和指标削减,使得一组指标之间的关系变得更简单而有条理,同时起到指标权重确定的作用。Reid等(2009)利用主成分分析得到了影响高温热浪灾害脆弱性的4个主成分(人口变量、土地利用、疾病、空调使用),并完成了美国高温热浪灾害脆弱性制图;Johnson等(2012)开发了极端高温脆弱性模型(Extreme Heat Vulnerability Index, EHVI),基于主成分分析确定模型影响因素的权重。总体来看,主成分分析法能够客观地进行指标权重确定,同时,提取的主成分能清晰地表示各指标之间的关系以及指标对于评价结果的贡献程度;然而,主成分分析作为一种客观定权的方法,其准确程度很大程度上依赖于指标的选取,特别是在脆弱性研究中,往往涉及自然、社会经济等多层面的要素指标及相互之间的耦合关系,主成

分分析的准确性直接依赖于指标选取的正确性。

作为现代决策科学的一个重要组成部分,多准则决策分析是指在一些不相关、不一致的规则基础上评估一系列可供选择的方案,并找出最优决策的分析方法,目前已被广泛运用在经济学、工程学、决策科学和可持续发展研究等众多领域。多准则决策分析的具体方法主要包括线性叠加模型(Linear Additive Model, LAM)、层次分析法(A analytical Hierarchy Process, AHP)、次序权重平均法(Ordered Weighted Averaging, OWA)、等级排序法(Outranking Method, OM)等。近年来,多准则决策分析方法被大量运用于高温热浪灾害脆弱性评价中。例如, Rinner 等(2006)在安大略湖的研究中,利用 AHP 法确定了高温热浪灾害影响因素权重; Zhu 等(2014)利用 AHP 法对广东省县级尺度高温热浪灾害脆弱性进行评价,并将其评价结果与主成分分析结果进行对比; Rinner 等(2010)在多伦多的研究中利用 OWA 法进行高温灾害脆弱性指标权重确定,并提供了乐观、中立、悲观3种情景下的高温灾害脆弱性空间分布; El-Zein 等(2015)利用等级排序法结合定量、半定量、定性数据对悉尼城区进行了高温脆弱性制图。相对而言,多准则决策分析方法对于处理多指标问题具有明显优势,可适用于定量、半定量、定性指标;但该方法很大程度上依赖于主观准则层权重设置的合理性,只能规避部分误差而不能纠正错误的准则权重设置,这也使其应用受到一定程度的限制。

根据研究概念框架的不同,指标综合主要包括自然要素与社会经济要素的综合,暴露、敏感、适应能力三者之间的综合等类型。而就指标综合具体表达方式而言,目前主要包括乘除法 and 加减法两种方式。例如, Aubrecht 等(2013)将高温热浪灾害脆弱性定量表征为自然环境要素和社会经济要素的乘积; El-Zein 等(2015)将暴露与敏感性的乘积除以适应能力来综合度量脆弱性;在 Vescovi 等(2005)的研究中,高温热浪灾害脆弱性被视为高温热浪灾害图层和社会经济脆弱性图层在 GIS 中等权叠加的结果; Frazier 等(2014)则将自然灾害脆弱性定量表征为“暴露 + 敏感性 - 适应能力”。由于乘除法相对于加减法而言能够更有效地反映出指标之间的协同作用关系(Ebert et al, 2004),要素乘除的指标综合方式受到越来越多学者的认同;加减法的指标综合方式尽管亦有采用,但已非主流。

### 3 城市高温热浪灾害脆弱性评价概念框架与指标体系

#### 3.1 评价概念框架

结合城市高温热浪灾害脆弱性评价国内外研究进展梳理,并整合自然灾害和气候变化相关学科概念,本文在广义脆弱性评价概念框架基础上,归纳出高温热浪灾害脆弱性评价框架(图1),重点强调从居民和区域两个层次关注适应能力,从而能从不同尺度提供减缓高温热浪灾害脆弱性的措施。而将人群的适应能力纳入高温热浪灾害脆弱性评价概念框架后,能更加完整的评价高温热浪灾害对城市居民健康的潜在威胁。本框架中,高温热浪灾害脆弱性被定义为暴露、敏感性和适应能力三者的函数,即:

$$\text{脆弱性} = \text{暴露} \times \text{敏感性} / \text{适应能力}$$

式中:暴露可被理解为人或系统与灾害的接近程度(Turner et al, 2003; Fussel, 2007),在高温热浪灾害脆弱性评价研究中,人群所处的地理位置决定了其面临高温热浪灾害威胁的可能性。例如,在炎热的夏季,同一个人处于“火炉”武汉和避暑胜地承德,其受到高温热浪灾害威胁的程度大为不同。即使在同一个城市,高温暴露也是有所差异的,城市中心和商业中心往往具有更高的温度(Brazel et al,

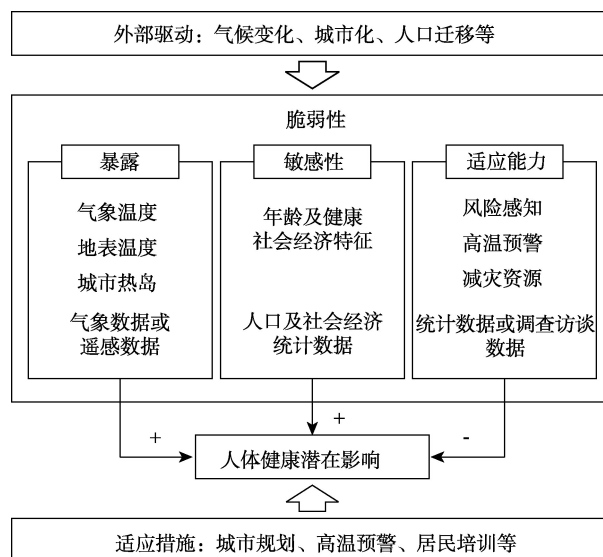


图1 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价概念框架

Fig.1 Conceptual framework for health related urban heat wave vulnerability assessment



2007)。敏感性表征居民能够承受的灾害最大影响(Turner et al, 2003; Fussel, 2007),不同的居民由于其身体素质和经济状况的不同,其能承受的高温热浪灾害的最大影响显著不同。例如,在同一城市街区居住的健康青壮年对于高温的抵抗能力就明显高于老年人。适应能力是指系统或人改变自身的状态、行为以便更好地适应已存在的或者预期压力的能力(Turner et al, 2003; Fussel, 2007)。高温热浪灾害的适应能力首先包括居民对于高温热浪灾害的认知、态度和实践(Wilhelmi et al, 2010)。对高温灾害知识的普及能够一定程度上提高居民的感知,从而转化为灾害规避行为,如在热浪来袭时主动减少不必要的高温暴露等。除了居民尺度的上述认知因素影响外,适应能力还在一定程度上受到社区或区域尺度的经济、社会 and 政策的约束。例如,对于居民个体或家庭而言,空调的可得性是表征适应能力的重要指标;而空调的可得性与居民或家庭的经济状况息息相关,后者则会受到社区经济状况甚至整个社会经济大环境的影响。由此可见,高温热浪灾害适应能力的探讨有必要强调尺度问题,小尺度的居民和家庭的适应能力会自下而上地影响整个区域大尺度的适应能力,反过来大尺度的宏观社会经济环境也会自上而下地控制居民和家庭抵抗高温热浪灾害的平均能力。一般而言,暴露、敏感性同脆弱性呈现正相关关系,暴露或敏感性越高,高温热浪灾害对人体健康的潜在影响越大,从而高温热浪灾害脆弱性就越高;而另一方面,适应能力则对脆弱性起一定的削减作用,适应能力越强,高温热浪灾害对人体健康的潜在影响越小,脆弱性就越低。同时,表征暴露、敏感性和适应能力的指标会被外部的驱动力所影响,如气候变化、社会经济大环境的变化以及城市发展等。例如,大规模城市群的发展能够影响城市的土地利用,从而导致城市热岛效应,使得城市居民的高温暴露增强。社会经济大环境的变化,如经济大萧条等,会导致区域适应能力的下降,城市居民经济状况下降,空调等降温设施的购买能力下降;经济萧条也会限制医疗资源的可得性,从而影响居民健康。

针对居民和区域等多尺度的适应能力,高温热浪灾害的风险规避也可以从不同尺度来实施。从居民和家庭尺度来看,首先要提高居民对于高温热浪灾害的认知和行动能力;同时要增加高温热浪灾害的应对资源如空调的置备等。从社区和区域等

大尺度看,要加强公众教育和相关培训,提高居民风险认知和规避能力;同时要丰富社区救助体系,完善高温预警措施,提升城市规划与管理能力等(Semenza et al, 1996; Reid et al, 2009)。

### 3.2 评价指标体系

城市高温热浪灾害脆弱性的定量表征,需要综合应用自然环境、社会经济、调查访谈等定量和定性数据(表1)。其中,暴露的表征主要包括气象站点监测数据、遥感影像数据或气候模型。气象站点监测数据具有高时间分辨率、低空间分辨率的特点,一般用于提取点状的高温热浪信息,当温度高于某一阈值时被视为暴露在高温热浪状态下(Reid et al, 2012)。目前,也有学者认为高温暴露程度与热量在城市地表覆盖(建筑物、植被等)的产生、存储和运输息息相关,因此可以利用遥感卫星反演的地表温度来表征(Uejio et al, 2011; Johnson et al, 2012)。遥感卫星反演的地表温度数据往往具有很强的空间连续性,能够明显识别出城市内部热量的空间分布状况。虽然地表温度不是环境感知温度的直接度量,但是许多研究已经表明两者之间有着明显的正相关关系(Voogt et al, 2003)。由于地表温度以及城市热岛的分布与城市地表覆盖关系紧密(谢苗苗等, 2009; Weng, 2009),因此表征地表覆盖的植被指数、建筑密度、不透水表面比例等也常常被应用于高温热浪暴露的定量表征(Uejio et al, 2011; Johnson et al, 2012)。Harlan等(2006)利用人体热舒适度模型,通过输入气温、湿度、风速、太阳辐射、阴影百分比等参数,得到人体热舒适度指数(Human Thermal Comfort Index, HTCI)来衡量人体在高温下的暴露情况。

敏感性的表征主要从人自身的生理状态及其所处的社会经济状态两个角度出发考虑。其中,人自身的生理状态如年龄、性别、疾病状况等都会影响其对于高温热浪灾害的敏感性(Cutter et al, 2008; Reid et al, 2009; Johnson et al, 2012)。例如,老年人(年龄 $\geq 65$ 岁)往往被认为是高温热浪灾害脆弱性群体,主要是由于老年人生理能力下降、患病可能性大、对于高温的抵抗能力差,再加之经济条件差、行动不便等,往往使其在灾害来临时得不到有效的疏散、帮助与救护(Cutter et al, 2008)。社会经济敏感性主要是指受教育水平、家庭收入、职业、家庭结构、社区邻里稳定性等(Reid et al, 2009; Uejio et al, 2011),这些条件决定了对高温热浪的防范、适应以

表 1 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价指标体系

Tab.1 Index system for health related urban heat wave vulnerability assessment

综合指标	要素指标	要素指标描述	增加(+)或减缓(-) 脆弱性	文献出处
暴露	气温	温度越高,健康威胁越大	温度高(+)	Reid et al, 2012
	地表温度	反映城市内部温度差异	温度高(+)	Johnson et al, 2012
	地表覆盖	与地表温度相关性强,反映城市内部温度差异	不透水比例高(+); 植被覆盖度高(-)	Johnson et al, 2012; Uejio et al, 2011
敏感性	人体舒适度	人在不同环境下舒适程度	舒适度高(-)	Harlan et al, 2006
	年龄	老人和小孩相对于青壮年来说身体抵抗能力差;自我保护 and 灾害应对能力弱	老人(+);小孩(+)	Cutter et al, 2008
	性别	女性对于男性来说身体抵抗能力弱,女性经济实力一般不如男性,灾后恢复难	女性(+)	Semanza et al, 1996; Cutter et al, 2003; Yip et al, 2008
	种族/民族	文化障碍及语言障碍使得灾害发生时少数民族疏散和救助所受阻碍较大	少数民族(+)	Reid et al, 2009; Uejio et al, 2011; Johnson et al, 2012
	疾病状况	患病的人身体抵抗能力弱	患病(+)	Reid et al, 2009
	受教育水平	受教育水平高者灾害认知能力强;灾害适应和灾后恢复的经济实力强	受教育水平高(-)	Reid et al, 2009; Uejio et al, 2011; Johnson et al, 2012
	收入	收入低者无力购买降温设施,灾后恢复也难展开	收入低(+)	Cutter et al, 2008; Reid et al, 2009
适应能力	职业	从事农林牧渔职业者,可支配收入较少	农林牧渔职业(+)	Cutter et al, 2008
	家庭结构	人口较多的家庭或单亲家庭往往需要在工作 and 照顾家庭之间权衡,经济压力较大	家庭规模大(+); 单亲家庭(+)	Cutter et al, 2008; Johnson et al, 2012
	独居	独居者与周围联系较少,灾害发生时可能得不到有效救助	独居(+)	Reid et al, 2009
	高温感知	对高温的全面认知和主动避灾行为有助于减缓灾害威胁	高温感知强(-)	Wilhelmi et al, 2010
	降温设备	空调等降温设备能在一定程度避免高温伤害	有空调(-)	Semanza et al, 1996; Klinenberg, 2003
	基础设施	绿地、湖泊等降温基础设施能减少高温热浪灾害发生可能性	绿地、湖泊比例大(-)	Johnson et al, 2012
	医疗资源	医疗资源(如医院、医生人数等)越多,灾后救助越有利	医疗资源丰富(-)	Cutter et al, 2003
	宣传教育	提高居民高温认知	宣传教育广泛(-)	Janssen, 2006; Wilhelmi et al, 2010

及灾害发生时得到救助的能力。O'Neill等(2003)对美国七个城市的研究表明,学历较低的人群较之高学历人群往往有更高的高温死亡率;1999年的芝加哥热浪事件中,高温致死率在平均收入少于10000美元的人群中偏高(Naughton et al, 2002);独居或邻里之间联系少的人群相比于社会联系较多、交通便利的人群,具有更高的高温灾害风险(Semanza et al, 1996)。

适应能力数据的获取需要包含居民小尺度和区域大尺度两个方面。居民尺度的数据包括居民的高温感知、空调等降温设备的购置情况等;区域尺度的数据包括区域绿地、水体等降温基础设施状

况、医疗资源的丰富度与可得性、区域高温知识宣传程度和效果等。适应能力数据的获取除了相关统计数据外,还可以通过调查问卷和访谈等方式获得利益相关者的第一手数据。近期的脆弱性研究表明,基于利益相关者的调查和访谈数据能够有效帮助构建社会脆弱性框架,并有助于评价结果和空间制图准确性的验证(Harlan et al, 2006; Leichenko et al, 2009)。同时,已有研究将访谈调查数据作为时空模型输入(Acosta-Michlik et al, 2008),预示着融合利益相关者的访谈数据所表征的适应能力,已成为高温热浪灾害脆弱性空间分析框架构建和完善的重要途径之一。

## 4 结语

城市高温热浪灾害给城市居民健康带来极大威胁,基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价逐渐得到重视。目前对于高温热浪灾害的研究,国内学者大多关注其本身性质及时空分布,缺乏基于居民健康的脆弱性评价;而国外关于高温热浪对居民健康的影响往往考虑暴露和敏感性两方面,对适应能力的探讨相对较少。本文基于广义的脆弱性研究框架,完善了基于“暴露—敏感性—适应能力”的高温热浪脆弱性评价概念框架,并梳理了相应的指标体系,重点强调从居民小尺度和区域大尺度两个方面对适应能力进行探讨。本文将不同尺度的适应能力纳入高温热浪灾害脆弱性评价框架,为居民自下而上与政府自上而下采取有针对性的高温热浪灾害减缓和预警措施,提供了从家庭到国家的多尺度途径;在指标体系上,自然环境数据与社会经济数据、定量统计数据与定性访谈调查数据的结合,为高温热浪灾害脆弱性研究提供了重要的数据基础。目前,基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价研究刚刚起步,对以下几个方面尚需高度关注、进一步探讨与完善:

(1)数据精度控制。高温热浪灾害脆弱性评价融合了遥感影像数据、气象数据、社会经济统计数据以及访谈调查数据等,有些研究还结合了致死率/致病率等作为模型验证数据。数据来源广泛使得精度控制十分重要,其中遥感反演的地表温度数据需要进行验证来保证反演精度,气象站点数据要保证测量的准确性与规范性,社会经济数据的选取要具有代表性,致死率/致病率等统计数据则力求准确可信。

(2)评价方法革新。目前关于脆弱性评价的方法较多,而针对高温热浪灾害脆弱性的定量方法主要集中在图层叠置、主成分分析和多准则决策分析等方法。在今后的研究中,可以进一步探讨引进生态遥感反演模型和人体健康机理模型,将高温热浪灾害脆弱性评价模型化,有效降低评价的不确定性。

(3)多尺度分析。就空间尺度而言,国家尺度的高温热浪灾害脆弱性研究有利于全国范围内的宏观调控与资源调配;而社区小尺度研究有利于高温预警、人员疏散等救助工作有针对性地开展。就时间尺度而言,由于区域热环境、人群结构、社会经

济状况在不同时间节点上的显著差异,使得高温热浪脆弱性评价需要高度关注时间动态。

(4)情景模拟。基于全球气候变化与城市发展的不确定性,高温热浪灾害脆弱性评价结果存在不确定性。因此,有必要设置不同的全球/区域升温模式、城市扩张模式和人为热排放模式,进行多情景模拟与方案权衡,从而对未来的风险防范提供多目标决策支持。

## 参考文献(References)

- 陈萍,陈晓玲. 2010. 全球环境变化下人—环境耦合系统的脆弱性研究综述[J]. 地理科学进展, 29(4): 454-462. [Chen P, Chen X L. 2010. Summary on research of coupled human-environment system vulnerability under global environmental change[J]. Progress in Geography, 29(4): 454-462.]
- 李鹤,张平宇. 2011. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. 地理科学进展, 30(7): 920-929. [Li H, Zhang P Y. 2011. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change[J]. Progress in Geography, 30(7): 920-929.]
- 李鹤,张平宇,程叶青. 2008. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 27(2): 18-25. [Li H, Zhang P Y, Cheng Y Q. 2008. Concepts and assessment methods of vulnerability[J]. Progress in Geography, 27(2): 18-25.]
- 苗爱梅,贾利冬,李苗,等. 2011. 近50年山西高温日的时空分布及环流特征[J]. 地理科学进展, 30(7): 837-845. [Miao A M, Jia L D, Li M, et al. 2011. The temporal and spatial distributions and circulation features of high temperature days during last 50 years in Shanxi[J]. Progress in Geography, 30(7): 837-845.]
- 彭建,刘焱序,潘雅婧,等. 2014. 基于景观格局—过程的城市自然灾害生态风险研究:回顾与展望[J]. 地球科学进展, 29(10): 1186-1196. [Peng J, Liu Y X, Pan Y J, et al. 2014. Study on the correlation between ecological risk due to natural disaster and landscape pattern-process: review and prospect[J]. Advances in Earth Science, 29(10): 1186-1196.]
- 秦大河. 2014. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 33(7): 874-883. [Qin D H. 2014. Climate change science and sustainable development[J]. Progress in Geography, 33(7): 874-883.]
- 王岩,方创琳,张蔷. 2013. 城市脆弱性研究评述与展望[J]. 地理科学进展, 32(5): 755-768. [Wang Y, Fang C L, Zhang Q. 2013. Progress and prospect of urban vulnerability[J]. Progress in Geography, 32(5): 755-768.]
- 谢苗苗,王仰麟,李贵才,等. 2009. 不同城市化阶段景观演



- 变的热环境效应动态: 以深圳西部地区为例[J]. 地理研究, 28(4): 1086-1094. [Xie M M, Wang Y L, Li G C, et al. Thermal environment effect dynamic of landscape changes in different urbanization phases: a case study of western Shenzhen[J]. Geographical Research, 28(4): 1086-1094.]
- 喻鸥, 阎建忠, 张懿铨. 2011. 区域气候变化脆弱性综合评估研究进展[J]. 地理科学进展, 30(1): 27-34. [Yu O, Yan J Z, Zhang Y L. 2011. Reviews on regional climate change vulnerability assessment[J]. Progress in Geography, 30(1): 27-34.]
- 张楠, 王建鹏. 2011. 西安高温热浪特征及对人体健康影响浅析[C]//第28届中国气象学会年会: S14气候环境变化与人体健康. 厦门. 中国气象学会. [Zhang N, Wang J P. 2011, November. Brief analysis of Xi'an high temperature heat characteristic and impact on human health[C]//The 28th annual meeting of meteorological society of China: S14 climate change and human health. Xiamen, China. Chinese Meteorological Society]
- 郑景云, 郝志新, 方修琦, 等. 2014. 中国过去2000年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展, 33(1): 3-12. [Zheng J Y, Hao Z X, Fang X Q, et al. 2014. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China[J]. Progress in Geography, 33(1): 3-12.]
- 郑有飞, 丁雪松, 吴荣军, 等. 2012. 近50年江苏省夏季高温热浪的时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 21(2): 43-50. [Zheng Y F, Ding X S, Wu R J, et al. 2012. Temporal and spatial feature analyses of summer high temperature and heat wave in Jiangsu Province in past 50 years[J]. Journal of Natural Disasters, 21(2): 43-50.]
- Acosta-Michlik L, Rounsevell M. 2008. An agent-based framework for assessing vulnerability futures[M]//Patt A G, Schröter D, Klein R J T, et al. 2008. Assessing vulnerability to global environmental change. London, UK: Earthscan: 147-171.
- Aubrecht C, Özceylan D. 2013. Identification of heat risk patterns in the US National Capital Region by integrating heat stress and related vulnerability[J]. Environment International, 56: 65-77.
- Brazel A J, Gober P, Lee S, et al. 2007. Dynamics and determinants of urban heat island change (1990-2004) with Phoenix, Arizona, USA[J]. Climate Research, 33(2), 171-182.
- Cutter S L, Finch C. 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(7): 2301-2306.
- Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. 2003. Social vulnerability to environmental hazards[J]. Social Science Quarterly, 84(2): 242-261.
- Eakin H, Luers A L. 2006. Assessing the vulnerability of social-environmental systems[J]. Annual Review of Environment and Resources, 31(1): 365-394.
- Ebert U, Welsch H. 2004. Meaningful environmental indices: a social choice approach[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 47(2): 270-283.
- El-Zein A, Tonmoy F N. 2015. Assessment of vulnerability to climate change using a multi-criteria outranking approach with application to heat stress in Sydney[J]. Ecological Indicators, 48: 207-217.
- Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. 2014. A framework for the development of the SERV model: a Spatially Explicit Resilience-Vulnerability Model[J]. Applied Geography, 51: 158-172.
- Füssel H M. 2007. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research[J]. Global Environmental Change, 17(2): 155-167.
- Hajat S, Armstrong B, Baccini M, et al. 2006. Impact of high temperatures on mortality: is there an added heat wave effect[J]. Epidemiology, 17(6): 632-638.
- Harlan S L, Brazel A J, Prasad L, et al. 2006. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress[J]. Social Science and Medicine, 63(11): 2847-2863.
- Harlan S L, Delet-Barreto J H, Stefanov W L, et al. 2012. Neighborhood effects on heat deaths: social and environmental predictors of vulnerability in Maricopa County, Arizona[J]. Environmental Health Perspectives, 121(2): 197-204.
- IPCC. 2001. Climate change 2001: the scientific basis. Working group II contribution to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Working group I contribution to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Working group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Janssen M A, Schoon M L, Ke W, et al. 2006. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change [J]. Global Environmental Change, 16(3): 240-252.



- Johnson D P, Stanforth A, Lulla V, et al. 2012. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socio-economic and environmental data[J]. *Applied Geography*, 35(1): 23-31.
- Klinenberg E. 2003. Heat wave: a social autopsy of disaster in Chicago[M]. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Leichenko R, O'Brien K. 2009. Mapping double exposure to climate change and trade liberalization as an awareness-raising tool[M]//Patt A G, Schröter D, Klein R J T, et al. Assessing vulnerability to global environmental change: making research useful for adaption, decision making and policy. London, UK: Earthscan: 133-146.
- Maier G, Grundstein A, Jang W, et al. 2014. Assessing the performance of a vulnerability index during oppressive heat across Georgia, United States[J]. *Weather, Climate, and Society*, 6(2): 253-263.
- Naughton M P, Henderson A, Mirabelli M C, et al. 2002. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 22(4): 221-227.
- O'Neill M S, Zanobetti A, Schwartz J. 2003. Modifiers of the temperature and mortality association in seven US cities [J]. *American Journal of Epidemiology*, 157(12): 1074-1082.
- Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, et al. 2005. Impact of regional climate change on human health[J]. *Nature*, 438: 310-317.
- Pelling M. 2004. Vision of risk: a view of international indicators of disaster risk and its management[R]. UNISDR/UNDP: King's College, University of London: December.
- Platt R H. 1994. The ecological city: introduction and overview[M]//Platt R H, Rowntree R A, Muick P C. The ecological city. Amherst, MA: University of Massachusetts Press: 1-17.
- Reid C E, Mann J K, Alfasso R, et al. 2012. Evaluation of a heat vulnerability index on abnormally hot days: an environmental public health tracking study[J]. *Environmental Health Perspectives*, 120(5): 715-720.
- Reid C E, O'Neill M S, Gronlund C J, et al. 2009. Mapping community determinants of heat vulnerability[J]. *Environmental Health Perspectives*, 117(11): 1730 - 1736.
- Rinner C, Patychuk D, Bassil K, et al. 2010. The role of maps in neighborhood-level heat vulnerability assessment for the city of Toronto[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 37(1): 31-44.
- Rinner C, Taranu J P. 2006. Map-based exploratory evaluation of non- medical determinants of population health[J]. *Transactions in GIS*, 10(4): 633-49.
- Semenza J C, Rubin C H, Falter K H, et al. 1996. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago[J]. *The New England Journal of Medicine*, 335(2): 84-90.
- Stott P A, Stone D A, Allen M R. 2004. Human contribution to the European heat wave of 2003[J]. *Nature*, 432: 610-614.
- Turner B L, Kasperson, R E, Matson P A, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14): 8074-8079.
- Uejio C K, Wilhelmi O V, Golden J S, et al. 2011. Intra-urban societal vulnerability to extreme heat: the role of heat exposure and the built environment, socioeconomics, and neighborhood stability[J]. *Health and Place*, 17(2): 498-507.
- Vescovi L, Rebetez M, Rong F. 2005. Assessing public health risk due to extremely high temperature events: climate and social parameters[J]. *Climate Research*, 30(1): 71-78.
- Voogt J A, Oke T R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 370-384.
- Weng Q. 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 335-344.
- Wilhelmi O V, Hayden M H. 2010. Connecting people and place: a new framework for reducing urban vulnerability to extreme heat[J]. *Environmental Research Letters*, 5: 014021.
- Wolf T, McGregor G. 2013. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom[J]. *Weather and Climate Extremes*, 1: 59-68.
- Yip F Y, Flanders W D, Wolkin A, et al. 2008. The impact of excess heat events in Maricopa County, Arizona: 2000-2005[J]. *International Journal of Biometeorology*, 52(8): 765-772.
- Zhu Q, Liu T, Lin H, et al. 2014. The spatial distribution of health vulnerability to heat waves in Guangdong Province, China[J]. *Global Health Action*, 7, doi: 10.3402/gha.v7.25051.

## Health related urban heat wave vulnerability assessment: research progress and framework

XIE Pan, WANG Yanglin, PENG Jian, LIU Yanxu

(Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences,  
Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** With global climate change and urbanization, nature hazards such as extreme heat, rainstorm, water-logging, and fog and haze pollution have become much more frequent in urban areas during the past decades. As a part of the urban hazards, heat wave has been a leading cause of weather related human mortality in many countries and given rise to dramatic negative effects on the health of urban residents and the economy. Heat wave events are attracting widespread attention of the academic research community. In China, existing studies on heat waves mainly focused on the intensity, frequency, duration as well as the spatial patterns of the events and seldom explored the impacts of the heat waves on the health of vulnerable urban residents. Adverse health effects of heat waves can be avoided by identifying populations that are vulnerable to heat waves and providing targeted assistance, thus the improvement of the assessment framework and methodology for health related urban heat wave vulnerability is of great significance. This article reviews the development in research themes, assessment framework, and quantitative methods about health related urban heat wave vulnerability in China and abroad during the past decades and presents a new research framework. Most of the conventional vulnerability assessments contain the elements of exposure and sensitivity. However, in this research, adaptive capacity at both individual and community scales has been taken into account in addition to exposure and sensitivity. An index system combining environmental indicators (such as air temperature, land surface temperature, and land use), demographic indicators (such as age, gender, and education level), and socioeconomic indicators (such as household income, employment, and neighborhood stability) has been built for quantitative vulnerability assessment. Meanwhile, qualitative data from questionnaire survey and in-depth interviews are recommended to be added to the framework for first hand information of the residents and local governments. This research provides theoretical support for health related heat wave vulnerability assessment, as well as help focus attention and resources on more targeted health interventions, heat hazards mitigation, and climate change adaptation strategies.

**Key words:** urban heat wave hazard; vulnerability assessment; resident health; adaptive capacity