

地理学视角下城市高温热浪脆弱性评估研究进展

薛倩¹, 谢苗苗^{1,2*}, 郭强¹, 王亚男¹, 武蓉蓉¹, 刘琦¹

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘要:全球气候变化及快速城市化增加了极端天气事件的发生频率,高温热浪作为其中的典型效应,增加了与热相关的健康风险,越来越受到气象学、医学与地理学学者的关注。论文系统梳理了高温热浪的定义,从地理学视角,以空间评估作为切入点,总结分析了高温热浪脆弱性评估中的空间指标、空间制图方法与空间对策等方面的研究进展,指明该领域已从单一视角逐步深入到气象学、医学、地理学等复合学科的交叉研究,地理学作为桥梁将气象学与医学有机结合,为脆弱性评估提供空间指标参数、为制图提供思路与方法,并提供空间对策连接规划和风险预警等实践工作。未来的研究展望包括:空间指标综合各学科研究需要、集成各学科优势进行构建,空间制图在社区小尺度到区域大尺度的耦合机理分析基础上探讨跨区域研究表达方式,空间对策针对不同风险人群采取差异化研究,为城市适应气候变化提供科学依据。

关键词:城市高温热浪;健康风险;地理学视角;脆弱性评估;空间途径

高温热浪是气候变化影响下最为典型的极端天气事件之一,增加了居民罹患与热相关疾病的健康风险,其影响遍及全球^[1]。20世纪以来,城市扩张已成为人类社会最为显著的特征^[2]。预计至2050年,全球居住在城市的比例将由2014年的54%上升至66%^[3]。由于热岛效应,城市居民在高温热浪时期将遭受更为严重的健康胁迫^[4-6]。因此,全球气候变化背景下,快速城市化区域关注人群健康风险成为高温热浪系列问题研究的关键之一。

长时间暴露于高温热浪天气会对健康产生危害。除直接致死外,高温热浪会诱发或加重一系列疾病,特别是心脑血管和呼吸系统疾病^[7-9]。老年人、小孩、慢性病患者等人群在高温热浪下更为脆弱^[10]。由此,高温热浪带来的负面影响已受到国内外众多研究关注,其造成的年平均死亡人数远高于其他极端天气事件^[11]。2003年,欧洲夏季热浪夺去了35000人的生命^[12];2013年,中国遭遇罕见高温热浪天气,其中上海作为重灾区,热浪相关死亡人

数达1347人^[13]。预计到2030年,世界范围内热相关死亡人数将超过90000人^[14]。

高温与人体健康之间的关系既不一致也很难预测^[15],受到如空气污染(臭氧、PM₁₀等)、个人长期不良行为习惯(吸烟、酗酒)等多种因素的混杂影响,且温度对人体发生作用存在滞后性^[16],研究中很难完全剥离其他因素。气象学视角以气象数据为基础,注重高温热浪成因分析、机理研究。医学视角通过发病率、死亡率作为健康指标,结合气象数据作为温度暴露表征,突出对于高温热浪致病人群、健康结果研究。然而,高温热浪健康风险是由高温暴露与社会人群自身脆弱性程度共同作用的结果^[17]。高温热浪脆弱性引申于自然灾害脆弱性研究^[18-19],关注“个人或群体在预测、应对、抵御和从自然灾害影响中恢复的能力的性质”,受到物理脆弱性、社会经济脆弱性等多方面因素影响^[20]。物理脆弱性是指特定危害对系统可能造成的潜在损害^[21],社会脆弱性是由贫穷、不平等、社会边缘化、医疗保障和住房质量

收稿日期:2019-04-25;修订日期:2019-06-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(41771204)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771204.]

第一作者简介:薛倩(1994—),女,江苏常州人,硕士生,主要从事综合自然地理与景观生态研究。E-mail: 18661244625@163.com

*通信作者简介:谢苗苗(1982—),女,河北保定人,副教授,主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

引用格式:薛倩,谢苗苗,郭强,等. 地理学视角下城市高温热浪脆弱性评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 685-694. [Xue Qian, Xie Miaomiao, Guo Qiang, et al. Research progress on urban heat wave vulnerability assessment: A geographical perspective. Progress in Geography, 2020, 39(4): 685-694.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.015

等多因素决定的^[20],被广泛应用于灾害管理、公共健康、气候变化等领域^[22-23]。高温热浪脆弱性表征人类社会经济系统在高温热浪压力下中受损害的程度差异,可有效刻画脆弱人群特征及脆弱程度差异,以提供针对性对策^[24]。

高温热浪健康风险并非于所有区域均质分布,实施空间规划差异化指引实践在减缓、防范高温热浪不利影响方面发挥着特殊作用^[25]。Smoyer^[26]、Wilhelmi等^[27]通过热相关死亡的空间变化表明对高温热浪健康风险存在空间差异性的关注;近年,He等^[28]运用多源数据,结合地理大数据(POI)探索高温热浪健康风险,精细描绘出热相关死亡风险空间分布,为城市应对热浪风险提供依据。由此发现,在高温热浪与健康风险问题上,学者们不仅已关注到风险空间差异问题,且不断探索新技术新方法为实践工作提供更科学的参考。因此,本文基于城市内部高温热浪健康风险的空间异质性,从地理学视角探讨高温热浪脆弱性评价中的空间问题,包括空间指标、空间制图方法及空间对策,以期为进一步完善高温热浪脆弱性评估研究框架及指标体系提供参考,为进一步促进气象、医学、地理等学科在高温热浪脆弱性领域的交叉融合提供启示。

1 高温热浪内涵及研究视角

1.1 高温热浪定义及内涵

由于不同研究区域气候背景、社会条件等的异质性,全球范围内高温热浪无统一定义^[29]。普遍认为高温热浪指持续数天的高温天气,以对人体健康产生危害的温度临界值作为判定依据^[30]。多数研究通过高温热浪的持续时长(duration)及发生强度(intensity)2个方面来衡量。

现有研究一致认为,高温天气连续 ≥ 2 d为高温热浪持续时长标准,目前最常采用的持续时长为2、3或4 d^[31],且普遍认为持续时长相比发生强度而言,导致的过量死亡风险较小。如对美国108个社区的研究中,当高温持续数天时,人的生理和行为已相对适应高温,因此其作用效果不显著^[32]。也有学者认为高温的持续使人们长时间暴露于该环境加深了身体负担,将产生额外的健康影响^[33]。

在高温热浪的发生强度表征上,最高/最低/平均温度、昼夜温差等多种指标的混合常作为高温热浪温度指标的表征,分为绝对强度和相对强度。

最高/最低温能较好反映温度的峰值水平,而平均温度体现整日温度暴露情况更佳^[34]。Barnett等^[35]在美国高温热浪相关死亡表征的最佳温度指标研究中,发现未有某一温度指标优于其他,原因在于最高、最低、平均温度之间本身高度相关。以往的研究常采用某一温度指标的绝对强度与某一持续时长的单一定义,如中国气象局规定日最高气温 ≥ 35 °C且连续3 d以上的高温天气可称作高温热浪。近年来,学者们开始探索采用高温热浪不同定义(发生强度、持续时长的不同组合)与健康影响的对比研究,不再限于某一绝对数值的相对强度,通过某种温度指标整体分布的某百分位数值(通常为90~99百分位)来精细刻画温度分布。如Chen等^[33]通过15种高温热浪定义对比研究南京2007—2013年高温热浪发生与否对日死亡率的影响,结果表明,不同定义下的高温热浪死亡率会产生显著差异,当大于夏季(5—9月)日平均温度整体分布的98%且持续4 d时,总体死亡率拟合效果最好。Xu等^[31]采用9种高温热浪定义评估2005—2015年澳大利亚布里斯班高温热浪对婴儿入院的影响,当强度增加至全年平均温度整体分布的97%以上时,婴儿的入院率随持续时间的增加而增加。以上研究证明高温热浪定义对健康相关研究起关键作用。

针对不同气候、人群等差异,根据实际需要与人群健康指标关联关系(如数据缺失最少或最利于实现研究区空间覆盖)选择温度指标^[16],探索社区小尺度适用的高温阈值是进一步研究的关键。

1.2 研究视角及框架

通过国内外相关文献(国外通过Web of Science(WoS)以“heat wave”为主题,国内通过CNKI以“高温热浪”为主题)检索发现,国外较早开展高温热浪相关研究,侧重于医学视角(图1c),利用死亡率(mortality)、发病率(morbidity)或是二者的混合作为健康结果(health outcomes)表征。由于死亡率是高温热浪人群健康结果最为直接的衡量,且适用于大规模人口研究,因此运用最为广泛^[15,36],但其在某种程度上高估了高温热浪的健康影响,毕竟致死是最为严重的后果,有研究建议可考虑赋予死亡率权重加以修正用于表征未来健康结果^[9]。发病率多采用住院和医疗急救相关数据表征,后者可进一步分为救护车呼叫、急救医疗服务、急诊就诊、急诊住院等^[37]。目前已发表的研究结果中,运用发病率表征健康结果的相对较少,原因与人群患病情况复杂、数据获

取难度大等有关。除利用健康结果指标外,结合气象数据作为温度暴露表征,关注点集中于不区分人群或特定人群(老人、小孩等)的健康风险评估以及全因或归因疾病(心脑血管、呼吸系统疾病等),突出对于高温热浪风险致病人群、健康结果、温度阈值的探究。如Li等^[38]通过对2007—2014年中国济南日气温与归因死亡率数据的研究发现,非意外死亡的高温阈值为32℃,心脑血管死亡的高温阈值为32℃,呼吸系统死亡的高温阈值为35℃,糖尿病死亡的高温阈值为34℃,其中女性和65岁以上老年人是更为脆弱的人群。然而,诸如此类的研究无法体现城市内部风险的空间差异,不利于提供针对性预警对策。

国内对高温热浪的研究侧重在气象学视角(图1b),通过气象数据时间序列,构建高温热浪相关指数等,注重高温热浪成因分析、机理研究。如黄卓等^[39]通过北京、上海、广州等10个城市1996—2005年逐日极端最高气温和日平均相对湿度数据,设计了综合表征炎热程度和过程累积效应的热浪指数;郑有飞等^[40]根据江苏省1955—2007年7—9月逐日最高气温资料,建立了各站点的高温日数、高温强度的时间序列,表明江苏省年均最高气温变化中5~6 a的周期震荡在各地区中明显存在。然

而,气象站点数目有限,不仅不能精细反映城市内部高温分布的空间差异,且未考虑人口密度及不同人群风险承受能力^[41]。

近年来,遥感数据在获取空间信息上的优势使其成为研究城市热环境的重要工具,为高温热浪研究提供了新的思路。地理信息技术为高温热浪风险识别和量化提供了一种有效途径。随着研究的深入,高温热浪研究已从简单考虑其自然因素发展为涵盖自然环境、社会经济条件等综合因素的考量。因此,从地理学视角,结合多源遥感数据和社会经济人口统计数据进行定量化研究的脆弱性评估,可有效反映高温热浪人群健康风险,全面涵盖成因(气候变化、城市化)、后果(死亡、健康胁迫)与发生过程,是当前及未来研究可参考的重要手段之一(图2)。

2 高温热浪脆弱性评估研究进展

目前,高温热浪脆弱性评估主要包括压力-状态-响应脆弱性评估^[20]、社会经济系统脆弱性评估^[42]、人-自然耦合脆弱性评估^[43]等,并无统一框架,其中最常用的脆弱性评估框架是政府间气候变化委员会(IPCC)在其第三次评估报告中提出的“暴露性-敏感性-适应性”框架^[44-46]。暴露性指特定区域某一时间内高温热浪的严重程度;敏感性表现为区域内部受到高温热浪潜在影响时,人类社会系统结构的稳定性;适应性指系统调节自身内部结构以减缓、防范高温热浪影响的能力^[19]。由于Cutter等^[42]提出的社会经济系统脆弱性评估具有代表性,多数研究一般均采用将敏感性(如年龄、性别、种族、收入

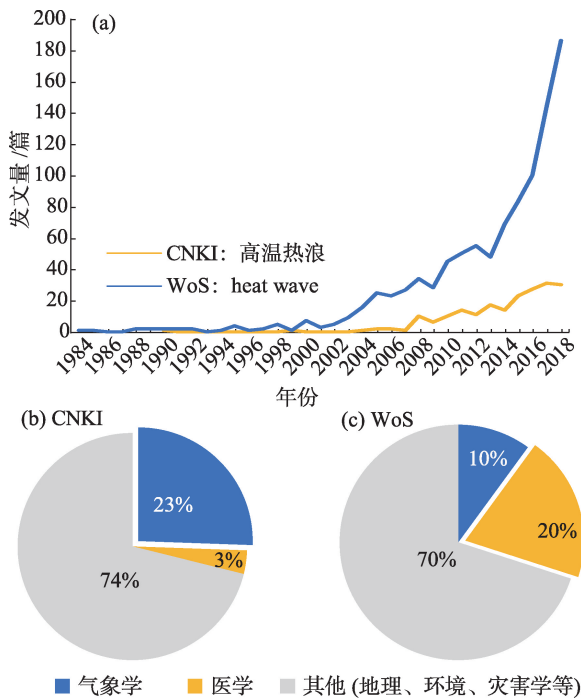


图1 高温热浪相关研究发文量及视角统计
Fig.1 Number of publications and disciplinary perspectives of heat wave related research

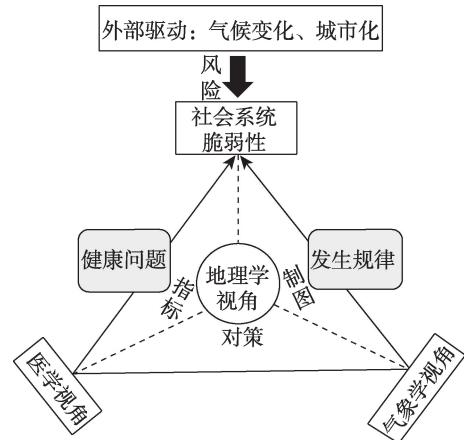


图2 高温热浪相关研究视角概念框架
Fig.2 Conceptual framework of heat wave related research

等)因素纳入评估框架中,但存在对暴露性或适应性的忽略。如Bradford等^[47]构建的社会脆弱性程度及适应性指标,未考虑对自然环境暴露性的考量;陈倩等^[48]构建的基于“高温危险性-人口暴露度-社会经济脆弱性”的高温热浪脆弱性评估框架,未考虑外界适应能力的作用。脆弱性评估重点在于评价哪一类群体(敏感性)在变化的自然环境状态(暴露性、适应性)下是脆弱的^[10],明确其空间分布及需要采取什么样的对策去适应这种变化。为了更好地管理与应对城市内部高温热浪风险,对其进行定量评估是必要的^[49],本文依据“暴露性-敏感性-适应性”评估框架,基于地理学视角,对研究重点关注的空间指标、空间制图方法、空间对策分别进行阐述。

2.1 空间指标

暴露性的表征以往主要通过气象站点检测数据或气候模型,气象数据由于受到尺度效应的制约,难以实现数据的面状覆盖,给开展城市区域尺度地表热环境研究带来困难,也有学者将气象数据进行插值处理作为暴露性评估的空间指标^[50]。直到1972年,Rao^[51]首次将环境卫星数据应用于城市热环境的空间分布研究中,随后国内外学者纷纷开始利用遥感数据进行城市热环境研究^[52]。目前,有研究认为高温暴露程度与城市地表覆盖(建筑物、植被等)息息相关,因此可以利用遥感数据反演的地表温度(land surface temperature, LST)来表征,地表温度虽不是环境感知温度的直接度量,但与近地表气温密切相关,而气温影响着人体健康和冷暖感受,已有许多研究表明两者之间存在明显的正相关关系^[53]。更为关键的是遥感卫星反演的地表温度具有很强的空间连续性,作为暴露性指标越来越受到学者们的青睐^[10,48-49,54-55]。同时,由于地表温度与地表覆盖关系密切^[56],表征地表覆盖的土地利用/土地覆盖^[10,57]、植被指数^[58]、建筑指数^[58]、不透水表面指数^[58-59]等也常常被应用于高温热浪暴露性的定量研究。人口越为密集的地区,人群暴露风险将更高,Wolf等^[49]研究结果证实高温热浪脆弱性水平与人口密度有很大关联。目前研究多基于人口普查单元刻画识别人口密度,受到普查小区尺度及数据可获取性的制约较大。

敏感性的表征一般从人自身的生理状况及其所处的社会经济状态两方面来考虑^[44]。其中,人自身的生理状况如年龄、性别、疾病状况等都会影响其在高温热浪期间的可承受程度。老年人(年龄 \geq

65岁)通常被认为是高温热浪的主要脆弱人群,原因在于老年人体温调节等生理功能下降,行动不便,抵御高温风险能力较弱,这在Yang等^[8]对广州的研究、Nayak等^[60]对纽约的研究中都得到了证实。社会经济条件的不同意味着不同人群面对高温热浪威胁的脆弱性程度不同,特定人群的脆弱程度更高^[50,61-62],通常从收入水平、受教育程度、失业率、种族、是否独居等方面判断^[62]。例如,Li等^[38]对济南的研究表明,教育程度较低者获得医疗卫生手段较有限,一般收入水平低,缺乏相关知识及预防措施,在高温热浪中死亡率较高;Uejio等^[59]对1995年芝加哥高温热浪事件研究表明,社会关系紧密的拉丁裔族裔在该次高温热浪事件中热相关死亡率最低,独居人群的高温热浪风险较高。

由于适应性指标与空间对策紧密相连,将适应能力纳入脆弱性评估框架及对适应性的定量化表征,是脆弱性评估研究的重要趋势^[44]。适应性通常由两方面表征:一方面是以获取统计数据为主的反映居民高温感知、防范知识储备等非空间性指标^[63],多用于社区小尺度的研究;另一方面为反映在高温热浪期间的医疗急救信息(医疗便捷度等)、降温设备(空调拥有率)、降温设施(绿地、水体占比等)配置的适应性空间指标研究,多集中于区域尺度。

目前,高温热浪脆弱性评估空间指标数据主要来源于遥感数据、统计数据、实地调查监测数据。其中,统计数据主要用来描述社会属性和生理条件,应用最多;遥感数据应用频次次之,主要用于描述暴露性相关的地表覆盖和温度指标;实地调查监测类数据用于温度暴露(空气温度)、降温能力和医疗急救能力的评估,应用最少(图3)。

2.2 空间制图

高温热浪脆弱性评估空间制图是直观表达空间差异的重要手段,制图包含脆弱性综合制图和单项评估因子制图。根据制图单元的不同以人口普查单元、土地利用单元、像元特征等非空间界限3种单元划分方式呈现。

以人口普查区或行政区划分单元的空间制图方式,通过人口普查、抽样统计等方式逐级汇总的人口与经济数据进行微观尺度的空间分析或综合性研究。如Wolf等^[49]采用人口普查区为评价单元对伦敦进行高温热浪脆弱性综合制图以体现其空间差异情况;Boumans等^[64]以美国奥斯汀特拉维斯县内不同人口普查单元中居民种族、性别、年龄、收

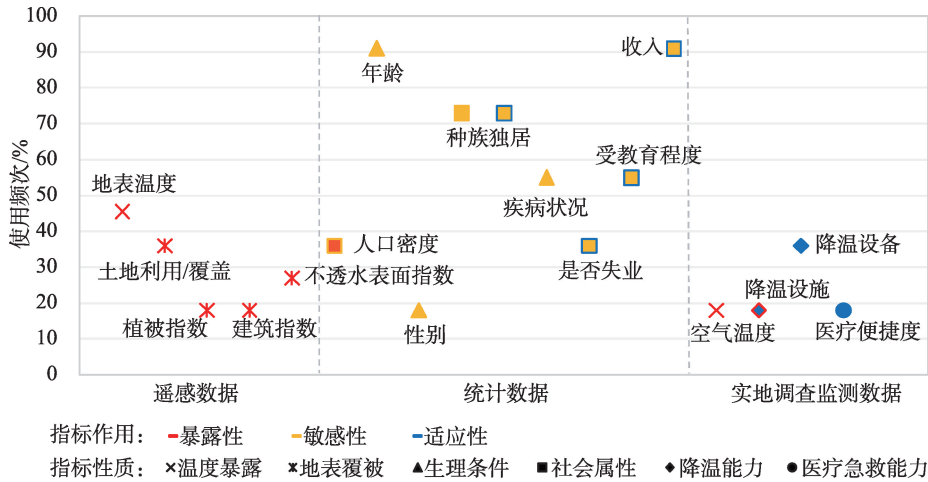


图3 高温热浪脆弱性评估空间指标类型及使用频次

Fig.3 Types and frequency of spatial indicators in heat wave vulnerability assessment

入等统计信息构成的社会脆弱性,将其与高温暴露情况叠加分析,以识别最需受到关注的区域。以人口普查区为制图单元的划分多见于国外学者对于敏感性或适应性指标的研究,其结果便于进行社会化管理以更好地提升人类福祉;国内研究受制于数据获取,多采用街道以上级别行政单元数据,存在的问题在于受到城市行政单元边界的限制,且数据精度较低,官方发布时效性不高,数据获取不易,使得研究较为困难。

以土地利用作为制图单元即通过土地利用类型的不同作为划分单元的依据。如Depietri等^[57]将土地利用/土地覆被类型提供的气候调节能力作为刻画高温热浪暴露性程度的一个度量因子。相对其他2种方法,这种单元划分方式用于高温热浪脆弱性评估制图应用最少。原因在于该种单元划分方式常适用于暴露性指标的象征,其制图结果便于城市规划中制定相关适应策略,但通常该种基于自然统计单元的制图方式与行政单元在空间尺度上很难匹配与融合,且难以与敏感性指标相结合用于综合性研究。

对于基于像元大小和温度分布情况等非空间

界限单元,通常需借助空间化驱动因子,如夜间灯光、不透水表面、土地利用等,可使社会经济人口数据得到精细化处理,一定程度上解决了社会经济人口统计数据获取困难的问题。如高云^[55]通过2010年深圳市街道尺度的基准地价、人均住宅面积、人均月租水平数据,利用不透水表面作为空间化驱动因子,使社会经济水平得到了较好的细化处理,经济指标分布趋势得到了更为准确的空间表达;陈倩等^[48]以长江三角洲地区为例,融合增强型植被指数、夜间灯光数据和DEM高程数据,获取了250 m分辨率的经过海拔校正的人居指数,对人口数据进行了空间化表达。然而,由于人口特征与空间化驱动因子的非线性关系,该制图方法有待结合严密的机理支撑及科学意义的验证(表2)。

2.3 空间对策

空间对策旨在利用空间分异措施干预以起到减缓、防范高温热浪风险的作用,解决有效性很大程度上取决于行为主体。按实施主体划分,可分为居民个体和政府及城市管理者。高温热浪影响很大程度上被低估部分来源于人们对热浪危害的认知不足。如1995年芝加哥热浪事件中,600人死于

表2 高温热浪脆弱性评估空间制图方法

Tab.2 Spatialization methods in heat wave vulnerability assessment

空间制图单元	描述	优点	缺点
人口普查单元	敏感性、适应性导向;国外研究中较多采用	利于社会管理	数据获取不易、精度低
土地利用单元	暴露性导向	城市规划优势	难于敏感性研究,不利于与行政单元融合
非空间界限(像元大小和温度分布情况等划分单元)	综合性探究	空间精细化表达	缺乏严密机理性支撑及科学验证

对高温热浪风险规模认识不足^[65]。然而,从居民个体层面的防范上,多在于自身是否配备降温设备。

从政府及城市管理者层面上,做好减缓及防范高温热浪风险的空间对策主要在于通过高温热浪空间预警平台建设(规划布局点位选择)、医疗设施布局(新建医院选址规划)、降温设施(绿地、水体等公共空间规划)配置。如 Dolney 等^[66]对 1999—2002 年加拿大多伦多市急救呼叫数据空间制图,并区分了工作日与周末的差异来体现高温状况下急救呼叫显著高于正常水平的时空分异性,结果表明研究期间,极端高温天气平均急救呼叫空间分布密度最高的集中于城市核心区,进而为新建医疗急救布局选址提供依据;Bradford 等^[47]通过人口普查数据、ArcGIS 地理空间建模及统计分析得到匹兹堡市热脆弱性指数,通过脆弱性评估结果优化冷却中心(cooling centers)的空间布局,不仅可预先提供存在降温能力的公共空间(如学校、图书馆、娱乐场所等)作为高温热浪期间临时冷却中心,同时提供对新建额外冷却中心的空间规划布局,有利于城市管理者做好成本效益决策,满足高温风险人群的降温需求。其中,降温设施的配置占据重要地位,是减缓高温热浪最适用、最综合的方法,且在不同的空间尺度上都可实施,例如私人屋顶、社区公园及城市街道绿化中^[29],因此被众多研究广泛采用。

从不同实施主体角度来看,居民个体更关注自身防范高温热浪风险能力的提升。政府、城市管理者将站在更全局的视角,考虑不同利益群体与全社会福祉的协调,综合把控以实现整体上适应能力的提高,这就要求未来应进一步加强综合性的空间对策研究,为城市规划、高温预警等提供实践工作连接(表3)。

3 研究展望

高温热浪是一种众所周知的公共卫生危害,与

许多健康结果,特别是与死亡率之间的关系,已在众多流行病学研究中得到证实^[67-70],高温热浪系列问题受到包括生物、环境、医学、社会和地理等在内的多种混杂且相互作用因素的影响^[15],未来的研究在以下方面仍存在较大发展空间:

(1) 对于空间指标,数据来源的单一性对指标构建造成困难。例如社会经济数据在小尺度存在缺失,且这一类数据官方发布存在一定的滞后。未来研究中,应进一步拓宽数据获取渠道,如通过空间大数据(街景图像、开放街道地图等)进行有效挖掘,并与实际问题关联,将其纳入空间指标研究中,更好地服务于高温热浪系列问题研究。不同学科背景数据来源不一,数据质量、精度存在差异,未来如何针对不同气候、人群等差异,进一步综合各学科研究需要、集成各学科优势,如将医疗急救数据作为高温热浪脆弱性评估后的验证,将为构建科学完善的高温热浪脆弱性评估指标体系提供依据。

(2) 对于空间制图,由于学科分异,以往的研究并没有与社会人群进行很好的关联,未来更需注重人-自然要素的耦合研究。人-自然耦合要素研究中,由于社会经济统计单元与自然统计单元的差异,二者不能有效融合对空间制图造成困难,通常研究对社会经济数据进行降尺度处理。目前,高温热浪脆弱性空间制图多集中于城市这一尺度,未来如何实现社区小尺度到区域大尺度的耦合以及跨区域比较并对其制图表达,以直观揭示不同气候背景、不同尺度下高温热浪风险模式差异仍需进一步研究,以期制定适当的整体或局部适应策略提供参考。

(3) 对于空间对策,高温热浪对所有人群均存在潜在风险,且不同人群适应策略存在差异,不仅是目前众多研究所集中关注到的老年人、小孩、慢性病患者、社会经济条件较差群体以及国外研究大多关注的少数族裔等。在中国,高温暴露下作业的建筑工人、快递员、外卖配送员等,均是高温热浪风

表3 高温热浪脆弱性评估空间对策

Tab.3 Spatial approaches of heat wave vulnerability assessment

准则层	实施目的	具体措施	实施主体
降温设施	有效调节生态系统结构,缓解城市高温热浪的影响	绿地、水体(如街道绿化、花园、河流、湿地等)规划布局	政府、城市管理者
降温设备	居民家庭提升降温避暑能力	空调设备	居民个体
医疗设施布局	高温热浪风险更高的区域,完善医疗资源(医院数量、医院规模、医生数量);提高救护响应能力	新建医院选址规划	城市管理者
空间预警平台	及时发出预警信息	布局点位选择	城市管理者

险下亟待关注的流动风险人群。居民个体的高温风险适应能力有限,且针对不同人群适应对策应突出差异性,如流动人群更需就近配备降温空间,如公共避暑场所建造;老年人由于自身生理条件局限,高温热浪发生时更易造成健康胁迫,更待得到医疗资源规划布局关注。这意味着未来需要政府、城市管理者等主体针对不同人群需求差异在实践应用层面的介入,同时加强空间预警平台构建也是一个有力的措施。

参考文献(References)

- [1] Daniel M, Clare H, Nathalie S, et al. Extreme heat-related mortality avoided under Paris Agreement goals [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 551-553.
- [2] 彭建,汪安,刘焱序,等.城市生态用地需求测算研究进展与展望[J].*地理学报*,2015,70(2):333-346.[Peng Jian, Wang An, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on measuring urban ecological land demand. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(2): 333-346.]
- [3] United Nations. World urbanization prospects: The 2014 revision: Highlights [M]. New York, USA: United Nations Population Division, 2014.
- [4] Hajat S. Impact of hot temperatures on death in London: A time series approach [J]. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 2002, 56(5): 367-372.
- [5] Gabriel K M A, Endlicher W R. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8-9): 2044-2050.
- [6] Arnberger A, Alex B, Eder R, et al. Elderly resident's uses of and preferences for urban green spaces during heat periods [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 21: 102-115.
- [7] Daniel O Å, Forsberg B, Joacim R. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies [J]. *Maturitas*, 2011, 69(2): 99-105.
- [8] Yang J, Liu H Z, Ou C Q, et al. Impact of heat wave in 2005 on mortality in Guangzhou, China [J]. *Biomedical & Environmental Sciences*, 2013, 26(8): 647-654.
- [9] 栾桂杰,周脉耕.气温对人群健康影响研究进展[J].*大家健康*,2015,9(22):14-16.[Luan Guanjie, Zhou Maigeng. Review of the effect of ambient temperature on population health. *Healthy People*, 2015, 9(22): 14-16.]
- [10] Manik T K, Syaukat S. The impact of urban heat islands: Assessing vulnerability in Indonesia [J]. *Journal of Physics B: Atomic Molecular & Optical Physics*, 2015, 37 (16): 3227-3237.
- [11] Jan K. Probability estimates of extreme temperature events: Stochastic modelling approach vs. extreme value distributions [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2002, 46: 93-112.
- [12] Scott P A, Stone D A, Allen M R. Human contribution to the European heat wave of 2003 [J]. *Nature*, 2004, 432: 610-614.
- [13] 陈敏,耿福海,马雷鸣,等.近138年上海地区高温热浪事件分析[J].*高原气象*,2013,32(2):597-607.[Chen Min, GengFuhai, Ma Leiming, et al. Analyses on the heat wave events in Shanghai in recent 138 years. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 597-607.]
- [14] Hales S, Kovats S, Lloyd S, et al. Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s [M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2014.
- [15] Sharon C, Remenyi T A, White C J, et al. Heatwave and health impact research: A global review [J]. *Health & Place*, 2018, 53: 210-218.
- [16] Yu W, Guo Y M, Ye X F, et al. The effect of various temperature indicators on different mortality categories in a subtropical city of Brisbane, Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 3431-3437.
- [17] Vescovi L, Rebetez M, Rong F. Assessing public health risk due to extremely high temperature events: Climate and social parameters [J]. *Climate Research*, 2005, 30(1): 71-78.
- [18] Janssen M A, Schoon M L, Ke W, et al. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 240-252.
- [19] 郑雪梅,王怡,吴小影,等.近20年福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱性比较[J].*地理科学进展*,2016,35(10):1197-1205.[Zheng Xuemei, Wang Yi, Wu Xiaoying, et al. Comparison of heat wave vulnerability between coastal and inland cities of Fujian Province in the past 20 years. *Progress in Geography*, 2016, 35(10): 1197-1205.]
- [20] Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters [M]. London, UK: Routledge, 1994.
- [21] Allen K. Vulnerability reduction and the community based approach [M]// Pelling M. *Natural disasters and development in a globalising world*. London, UK: Routledge, 2003: 170-184.
- [22] 李鹤,张平宇,程叶青.脆弱性的概念及其评价方法[J].*地理科学进展*,2008,27(2):18-25.[Li He, Zhang

- Pingyu, Cheng Yeqing. Concepts and assessment methods of vulnerability. *Progress in Geography*, 2008, 27(2): 18-25.]
- [23] 李鹤, 张平宇. 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*, 2011, 30(7): 920-929. [Li He, Zhang Pingyu. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 920-929.]
- [24] Zein A E, Tonmoy F N. Nonlinearity, fuzziness and incommensurability in indicator-based assessments of vulnerability to climate change: A new mathematical framework [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 82-93.
- [25] Bicknell J, Dodman D, Satterthwaite D. Adapting cities to climate change: Understanding and addressing the development challenges [M]. London, UK: Routledge, 2009.
- [26] Smoyer K E. Putting risk in its place: Methodological considerations for investigating extreme event health risk [J]. *Social Science & Medicine*, 1998, 47(11): 1809-1824.
- [27] Wilhelmi O V, Purvis K L, Harriss R C. Designing a geospatial information infrastructure for mitigation of heat wave hazards in urban areas [J]. *Natural Hazards Review*, 2004, 5(3): 147-158.
- [28] He C, Ma L, Zhou L, et al. Exploring the mechanisms of heat wave vulnerability at the urban scale based on the application of big data and artificial societies [J]. *Environment International*, 2019, 127: 573-583.
- [29] Marie J H, Christopher L, Daniel J L, et al. Facing the heat: A systematic literature review exploring the transferability of solutions to cope with urban heat waves [J]. *Urban Climate*, 2018, 24: 714-727.
- [30] 王昕宇, 曾坚. 城市高温热浪灾害防灾规划策略研究: 基于欧美国家的规划经验 [J]. *现代城市研究*, 2017(8): 84-92. [Wang Xinyu, Zeng Jian. Study on city heatwave hazard planning strategies based on European and north American countries' planning experience. *Modern Urban Research*, 2017(8): 84-92.]
- [31] Xu Z, Crooks J L, Black D, et al. Heatwave and infants' hospital admissions under different heatwave definitions [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 229: 525-530.
- [32] Gasparrini A, Armstrong B. The impact of heat waves on mortality [J]. *Epidemiology*, 2011, 22: 68-73
- [33] Chen K, Bi J, Chen J, et al. Influence of heat wave definitions to the added effect of heat waves on daily mortality in Nanjing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 506-507: 18-25.
- [34] McMichael A J, Wilkinson P, Kovats R S, et al. International study of temperature, heat and urban mortality: The 'ISOTHURM' project [J]. *International Journal of Epidemiology*, 2008, 37(5): 1121-1131.
- [35] Barnett A, Tong S, Clements A. What measure of temperature is the best predictor of mortality? [J]. *Environment Research*, 2012, 118: 149-151.
- [36] Chan N Y, Stacey M T, Smith A E, et al. An empirical mechanistic framework for heat-related illness [J]. *Climate Research*, 2001, 16(2): 133-143.
- [37] Li M, Gu S H, Peng B, et al. Heat waves and morbidity: Current knowledge and further direction- A comprehensive literature review [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(5): 5256-5283.
- [38] 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]. *Environmental Research*, 2017, 156: 657-664.
- [39] 黄卓, 陈辉, 田华. 高温热浪指标研究 [J]. *气象*, 2011, 37(3): 345-351. [Huang Zhuo, Chen Hui, Tian Hua. Research on the heat wave index. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(3): 345-351.]
- [40] 郑有飞, 丁雪松, 吴荣军, 等. 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*, 2012, 21(2): 43-50. [Zheng Youfei, Ding Xuesong, Wu Rongjun, et al. Temporal and spatial feature analyses of summer high temperature and heat wave in Jiangsu Province in past 50 years. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(2): 43-50.]
- [41] 何苗, 徐永明, 李宁, 等. 基于遥感的北京城市高温热浪风险评估 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4): 635-642. [He Miao, Xu Yongming, Li Ning, et al. Assessing heat wave risk in Beijing by remote sensing. *Ecology and Environment*, 2017, 26(4): 635-642.]
- [42] Cutter S L, Boruff B J, Shirley W L. Social vulnerability to environmental hazards [J]. *Social Science Quarterly*, 2003, 84(2): 242-261.
- [43] Eakin H, Luers A L. Assessing the vulnerability of social-environmental systems [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2006, 31: 365-394.
- [44] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 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*, 2015, 34(2): 165-174. [Xie Pan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Health related urban heat wave vulnerability assessment: Research progress and framework. *Progress in Geography*, 2015, 34(2): 165-174.]
- [45] IPCC. Climate change: Impacts, adaptation and vulnerability [M]. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge Uni-

- versity Press, 2007.
- [46] IPCC. Climate change: Impacts, adaptation and vulnerability [M]. Working Group Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [47] Bradford K, Abrahams L, Hegglin M, et al. A heat vulnerability index and adaptation solutions for Pittsburgh, Pennsylvania [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 11303-11311.
- [48] 陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 1475-1484. [Chen Qian, Ding Mingjun, Yang Xuchao, et al. Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta region, China. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(11): 1475-1484.]
- [49] Wolf T, McGregor G. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2013, 1: 59-68.
- [50] Aubrecht C, Özceylan D. Identification of heat risk patterns in the U. S. National Capital Region by integrating heat stress and related vulnerability [J]. *Environment International*, 2013, 56: 65-77.
- [51] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53(7): 647-648.
- [52] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展 [J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147. [Yao Yuan, Chen Xi, Qian Jing. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1134-1147.]
- [53] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 335-344.
- [54] Johnson D P, Stanforth A, Lulla V, et al. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data [J]. *Applied Geography*, 2012, 35(1-2): 23-31.
- [55] 高云. 深圳西部热环境脆弱性评价及其空间分布 [D]. 北京: 中国地质大学, 2015. [Gao Yun. Assessment of Shenzhen western thermal environment vulnerability. Beijing, China: China University of Geosciences, 2015.]
- [56] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 35-41. [Xie-Miaomiao, Wang Yanglin, Fu Meichen. An overview and perspective about causative factors of surface urban heat island effects. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 35-41.]
- [57] Depietri Y, Welle T, Renaud F G. Social vulnerability assessment of the Cologne urban area (Germany) to heat waves: Links to ecosystem services [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2013, 6: 98-117.
- [58] Krstic N, Yuchi W, Ho H C, et al. The heat exposure integrated deprivation index (HEIDI): A data-driven approach to quantifying neighborhood risk during extreme hot weather [J]. *Environment International*, 2017, 109: 42-52.
- [59] Uejio C K, Wilhelmi O V, Golden J S, et al. Intra-urban societal vulnerability to extreme heat: The role of heat exposure and the built environment, socioeconomics, and neighborhood stability [J]. *Health & Place*, 2011, 17(2): 498-507.
- [60] Nayak S G, Shrestha S, Kinney P L, et al. Development of a heat vulnerability index for New York State [J]. *Public Health*, 2018, 161: 127-137.
- [61] Lankao P R, Qin H. Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3(3): 142-149.
- [62] Weber S, Sadoff N, Zell E, et al. Policy-relevant indicators for mapping the vulnerability of urban populations to extreme heat events: A case study of Philadelphia [J]. *Applied Geography*, 2015, 63: 231-243.
- [63] 李永红, 汪庆庆, 兰莉, 等. 中国四城市社区居民应对高温热浪的干预措施效果评估 [J]. *中华预防医学杂志*, 2018, 52(4): 424-429. [Li Yonghong, Wang Qingqing, Lan Li, et al. Intervention effect assessment of response to heatwave in communities of four cities, China. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2018, 52(4): 424-429.]
- [64] Boumans R J M, Phillips D L, Victory W, et al. Developing a model for effects of climate change on human health and health-environment interactions: Heat stress in Austin, Texas [J]. *Urban Climate*, 2014, 8: 78-99.
- [65] Dematte J E, O'Mara K, Buescher J, et al. Near-fatal heat stroke during the 1995 heat wave in Chicago [J]. *Annals of Internal Medicine*, 1998, 129(3): 173-181. doi: 10.7326/0003-4819-129-3-199808010-00001.
- [66] Dolney T J, Sheridan S C. The relationship between extreme heat and ambulance response calls for the city of Toronto, Ontario, Canada [J]. *Environmental Research*, 2006, 101: 94-103.
- [67] Rosenthal J K, Kinney P L, Metzger K B. Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997-2006 [J]. *Health & Place*, 2014, 30: 45-60.

- [68] Hondula D M, Davis R E, Saha M V, et al. Geographic dimensions of heat-related mortality in seven U. S. cities [J]. *Environmental Research*, 2015, 138: 439-452.
- [69] Yang J, Peng Y, Sun J M, et al. Heatwave and mortality in 31 major Chinese cities: Definition, vulnerability and implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 695-702.
- [70] Chen K, Horton R M, Bader D A, et al. Impact of climate change on heat-related mortality in Jiangsu Province, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 317-325.

Research progress on urban heat wave vulnerability assessment: A geographical perspective

XUE Qian¹, XIE Miaomiao^{1,2*}, GUO Qiang¹, WANG Yanan¹, WU Rongrong¹, LIU Qi¹

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: With global climate change and rapid urbanization, extreme weather events have become much more frequent. As one of the most typical extreme weather events caused by climate change, heat wave has been enhancing the heat-related health risks, and continuously attracting widespread attention from meteorologists, medical professionals and geographers. As a bridging actor integrating meteorological and medical fields, geography provides spatial indicators for heat wave vulnerability assessment, ideas and methods for mapping, spatial solutions for practical work such as planning and early warning. This article systematically reviews the progress of spatial assessment of heat wave vulnerability based on the perspective of geography. The contents include the definition of heat wave, spatial indicators and mapping methods. The literature reviews indicate that heat wave vulnerability assessment has gradually deepened from single perspective to the interdisciplinary study of meteorology, medicine, geography and other disciplines. In the future, more detailed exploration will be carried out, such as the construction of spatial indicators to integrate the advantages and research demands of various disciplines; the exploration about small-scale community to regional large-scale links and cross-regional research expression by mapping. Spatial approaches require differentiated research among different groups, which provide a scientific basis for climate change adaptation of cities.

Keywords: urban heat wave; health hazard; geographical perspective; vulnerability assessment; spatial approaches