

基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评估

谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 彭建

(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: 本研究通过综合考虑高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露, 提出基于社会脆弱性的高温灾害风险评估框架, 结合气象数据、遥感数据、社会经济数据构建多元数据融合的评价指标体系, 开展全国分县高温灾害风险评估。研究结果表明, 高温灾害脆弱性热点区域主要集中在中国新疆西部、豫西皖北交界处、四川盆地、洞庭湖流域、广西境内珠江流域; 而华中地区湖北江汉平原和湖南洞庭湖流域、西南地区四川省和重庆市交界处的四川盆地、华东地区江浙沪一带、华南珠江流域, 则是中国突出的高温灾害风险热点区。高温灾害脆弱性热点区和高温灾害风险热点区的分布出现比较明显的差异, 高温灾害脆弱性热点区主要分布于高温胁迫较高或社会经济较差的不发达地区, 区域人群由于经济上的适应能力较差而受到高温威胁的概率较大; 而高温灾害风险则强调灾害一旦发生时的可能损失, 其热点区域主要分布于人口聚集、经济较为发达的大城市区域。就主导因子分区来说, 高温胁迫主导区域主要为平原、盆地以及大江大河流域, 社会脆弱性主导区域主要位于经济欠发达地区以及脆弱性人群聚集区; 人口暴露主导区域则主要集中在人口密集的中心城市和沿海地区。

关键词: 高温灾害风险; 人群健康; 高温胁迫; 社会脆弱性; 主导因子分区

DOI: 10.11821/dlxb201507002

1 引言

全球气候变化背景下, 极端气候事件频繁发生, 给人类健康和社会经济带来了极大影响^[1-2]。作为极端气候事件的重要类型, 夏季极端高温已经在全世界范围内广泛出现, 并且未来还会在发生频率、影响范围和持续时间上继续增强^[3]。夏季温度过高所导致的高温灾害事件直接影响人类健康, 1995年美国芝加哥热浪事件、2003年欧洲热浪事件等曾造成大量的人员死亡^[4-5]; 夏季温度过高还会增加心血管、呼吸道、消化道等疾病的发病率^[4]; 而高温天气容易导致有害气体和烟尘的积累造成环境污染, 进一步威胁人体健康^[6]。然而, 有针对性的高温预警和资源调配等空间管控措施可以将预期风险降到最低。不同特征人群对于高温的抵抗能力不同。因此, 脆弱人群识别以及高温灾害人群健康风险评估对于针对性的防灾减灾和资源调配具有重要意义。在中国, 由于区域气候条件、人群社会经济状况的差异, 高温灾害人群健康风险分布呈现明显的空间异质性, 有必要对全国高温灾害人群健康风险空间格局进行识别, 为区域风险防范提供定位定量指引^[7]。

收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-05-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330747) [Foundation: Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.41330747]

作者简介: 谢盼(1989-), 女, 湖北赤壁人, 硕士, 主要从事综合自然地理与景观生态研究。

E-mail: xiepan1234@gmail.com

通讯作者: 王仰麟(1963-), 男, 陕西合阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn

目前国内学者针对高温灾害的研究大多关注高温天气本身特质（例如高温灾害强度、发生频率以及持续时间等）、成因和空间分布^[8-10]；部分研究关注高温灾害对于农作物或者社会经济的影响^[11-12]，而高温天气对于人群健康影响的研究还较为少见。国外对于高温与人体健康关系的研究最初主要侧重于病理方面，关注高温对于个体健康的影响机理，例如对人体健康产生不利影响的温度阈值^[13]，高温致死率与死亡个体生理状况（年龄、性别、病史等）和社会经济状况（教育水平、职业、收入等）关系等^[4, 14]。不同于早期对于个体健康的关注，近年来兴起的脆弱性研究侧重于通过探究脆弱人群的空间分布特征来量化区域人群健康风险。脆弱性指特定人群对于有害胁迫的响应或适应能力，就高温灾害脆弱性来说，不同人群由于生理特征（年龄、性别、疾病状态等）以及社会经济特征（职业、受教育水平、收入等）的差异对于高温灾害的抵抗能力也不同，从而面临不同的健康风险^[15]。高温灾害脆弱性研究旨在通过自然环境、人口、社会经济等方面的变量构造脆弱性评价指标体系，实现对区域高温灾害人群健康脆弱性的定量表征，从而达到识别脆弱人群空间分布特征的目的^[16-17]。相较于高温灾害脆弱性分析而言，高温灾害风险评价进一步关注了高温胁迫下的可能损失，即强调人口、财产以及生态系统等在高温下的暴露情况^[17-18]。目前的高温灾害与人群健康关联研究往往止步于高温灾害脆弱性制图，较少有研究关注将人口暴露纳入考虑的高温风险评价^[19-20]；而在中国，对于高温灾害风险的研究还不多见，少有的研究侧重于城市及区域范围，全国范围的研究多限制在省级或市级等较粗的尺度进行探讨^[7, 12]。

基于此，本研究在IPCC（2014）第五次研究报告提出的灾害风险评价框架的基础上完善了基于“高温胁迫—社会脆弱性—人口暴露”的高温灾害人群健康风险评价概念框架^[21]；结合气象数据、遥感数据、社会经济统计数据，运用主成分分析和数理统计方法，借助GIS和RS平台，完成了全国县域尺度的高温灾害风险评价工作；以期为全国范围内县域尺度更有针对性的空间管控、资源调配、高温预警等措施的制定提供指引。

2 研究方法

2.1 高温灾害风险评价概念框架

IPCC（2014）第五次研究报告强调了风险评估在全球气候变化研究中的重要意义，提出了基于“灾害胁迫—社会脆弱性—暴露”的自然灾害风险评价框架。夏季高温作为一种威胁人类健康的天气类型，在极端情况下会导致高温灾害事件，对人类健康、社会财产以及生态系统等产生威胁^[22-23]。在IPCC框架的基础上，本文以区域人群健康风险作为评估目标，构建了基于“高温胁迫—社会脆弱性—人口暴露”的高温灾害人群健康评价框架（图1）。

高温胁迫指人群所处区域发生高温灾害的可能性，是区域环境与高温热浪灾害接近程度的表征^[24]。全球气候变化、土地利用、城市热岛效应等自然变异或人为影响因素都会改变区域热环境从而导致不同的高温胁迫程度^[25]。社会脆弱性指特定人群容易受高温影响或无法对抗高温危害的程度，包括敏感性和适应能力两方面^[15]。其中敏感性表征居民能够承受的高温胁迫最大影响^[26]，不同人群由于身体素质和经济状况的不同，其敏感性也就不同。敏感性具体包括人的生理状态以及社会经济状态（受教育水平、职业、收入、邻里稳定性等）^[16-17, 27-28]。适应能力是指系统或人改变自身的状态或行为以便更好地适应已存在的或者预期的压力的能力^[26]，其在一定程度上受到社区或区域尺度的经济、社会或者政策的约束，例如区域经济状况、基础设施以及社会福利等^[25]。暴露是指可能受到灾害不利影响的人或物^[12]，广义的暴露对象包括生命财产、人体健康、生态系统、

资源环境、基础设施等, 而本研究特指高温胁迫区域的人口暴露。同时, 高温胁迫和社会脆弱性交相互作用关系可以表征为高温灾害脆弱性, 其代表特定区域人群健康受到高温灾害威胁的可能概率^[19-20]。与脆弱性不同, 风险代表受到灾害威胁时的可能损失^[2, 29], 需要在脆弱性基础上考虑受

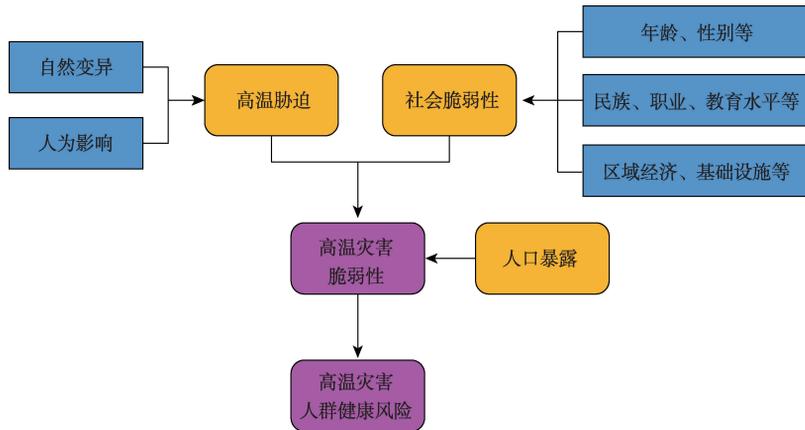


图1 高温灾害人群健康风险评价概念框架

Fig. 1 Framework of population health risk assessment due to heat stress

体的暴露情况, 本框架中特指高温灾害人群健康风险, 即高温威胁人群健康时造成的可能损失是高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露三者共同作用的结果。

本研究为全国范围内县域尺度的研究, 共涉及全国县域2409个(除去台湾等无数据区域)。高温胁迫数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)的中国地面气候标准值日值数据集, 去除部分难以使用站点后由全国829个气象站点观测数据在ANUSPLIN软件中插值得到全国范围内的空间化温度数据。社会脆弱性数据由表征敏感性和适应能力两方面的数据组成, 敏感性数据包括各县域<5岁人口比例, ≥65岁人口比例, 女性人口比例, 高中以下受教育水平人口比例, 农林牧渔从业人口比例, 失业率和家庭户规模; 适应能力数据包括人均GDP, 社会保障、社会福利业从业人口比例, 有洗澡设施的住房比例。其中, 人均GDP数据来源于全国1 km格网的GDP数据集, 其他数据来源于2010年第六次全国人口普查。人口暴露数据利用县域总人口数表征, 数据来源于2010年第六次全国人口普查。

2.2 高温灾害风险评价模型

由高温灾害人群健康风险评估概念框架可知(图1), 高温灾害脆弱性和高温灾害风险可以由高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露三个指标综合得到。其中高温灾害风险为高温胁迫、社会脆弱性、人口暴露三者共同作用的结果; 高温灾害脆弱性为高温胁迫、社会脆弱性共同作用的结果。指标综合具体表达方式一般包括乘除法和加减法两种^[19-20, 30], 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^[31], 要素乘除的指标综合方式受到越来越多学者的认同。据此, 高温灾害脆弱性和高温灾害风险由高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露三个指标通过乘法运算得到, 其中高温胁迫、社会脆弱性和人口暴露数值均归一化为[0, 1]。具体计算方法如下:

$$\text{高温灾害脆弱} = \text{高温胁迫} \times \text{社会脆弱性} \quad (1)$$

$$\text{高温灾害风险} = \text{高温胁迫} \times \text{社会脆弱性} \times \text{人口暴露} \quad (2)$$

2.2.1 高温胁迫评价 在中国一般认为当气温≥35℃时为极端高温现象, 会对人体健康产生不利影响^[18, 32]。本文选取近30年(1981-2010)全国829个气象站点年均日最高温≥35℃总天数作为高温胁迫的表征。针对站点数据的空间不连续性, 可以用空间差值的方法得到全国范围内的空间化的气温数据。空间插值借助ANUSPLIN软件, 基于薄盘样条函数理论引入多个影响因子(经度、纬度、高程等)作为协变量进行气象要素空间插值^[33-34]。

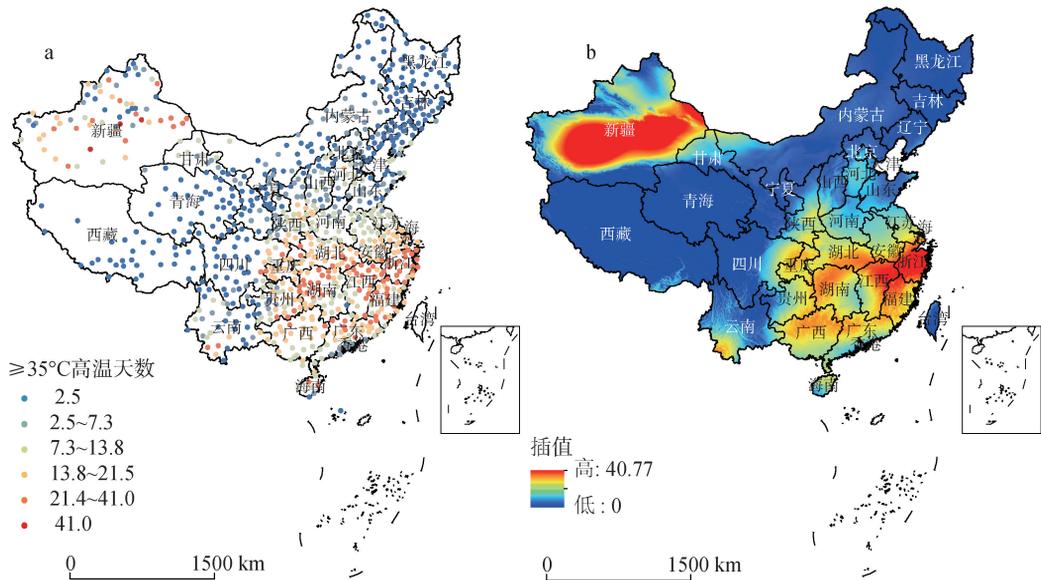


图2 中国近30年来年均 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温天数分布

Fig. 2 Spatial pattern of extreme heat days in China

全国各站点年均 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 高温天数及空间插值结果 (图2), 中国极端高温主要集中在新疆中部以及广大东部地区, 青藏高原和东北地区几乎没有极端高温出现。

2.2.2 社会脆弱性评价 主成分分析 (PCA) 是一种适用于多变量的数据降维技术, 它通过数据之间的相互关系进行聚类 and 指标削减, 使得一组指标之间的关系变得更简单而有条理, 从而能够客观进行指标确权^[26]。本研究中社会脆弱性采用主成分分析法确定, 原始指标首先要通过 KMO 检验才能进行主成分分析, KMO 检验值用于判断原始指标的相关性。本研究中 $\text{KMO} = 0.725$, 通过检验, 满足进行主成分分析的要求。利用最大方差旋转法提取了特征根大于 1 的四个主成分, 分别为社会经济水平、幼儿和民族、老人与女性、失业率, 解释率依次为 37.43%、15.45%、9.84%、9.44%, 综合解释率达到 72.16% (表 1)。其中, 第一主成分 (社会经济水平) 主要变量包括表征敏感性的高中以下受教育水平人口比例、农林牧渔从业人口比例, 以及表征适应能力的社会保障社会福利从业人口比例、人均 GDP、有洗澡设施的住房比例; 第二主成分 (幼儿和民族) 主要变量包括少数民族人口比例、家庭户规模、 < 5 岁人口比例; 第三主成分 (老人与女性) 主要变量包括女性人口比例和 ≥ 65 岁人口比例; 第四主成分 (失业率) 包括变量为失业率。第一主成分解释率远远高于其他主成分, 说明社会经济因素在社会脆弱性中起到最为重要的作用, 社会经济状况越差区域的社会脆弱性往往越高。

3 结果分析

3.1 高温灾害脆弱性分级

在 ArcGIS 内求得各县域的年均高温胁迫天数, 并按照自然断点法由低到高分 1~6 等级 (图 3)。高温胁迫最高等级 (第 6 等级) 区域分布于新疆中部、浙江省以及江西东部和福建北部; 高温胁迫次高等级 (第 5 等级) 区域位为新疆南部和东部, 华中和华东的大部分地区 (湖北、湖南、广西、广东、福建等) 以及西南的四川盆地; 高温胁迫的

表1 社会脆弱性主成分分析结果

Tab. 1 PCA result of social vulnerability

主成分	特征根	解释率(%)	变量	主成分载荷
1. 社会经济水平	2.894	37.43	高中以下受教育水平人口比例	+0.887
			农林牧渔从业人口比例	+0.777
			社会保障、社会福利业人口比例	-0.859
			人均GDP	-0.564
			有洗澡设施的住房比例	-0.445
2. 幼儿和民族	2.512	15.45	少数民族人口比例	+0.739
			家庭户规模	+0.738
			<5岁人口比例	+0.669
3. 女性和老人	1.355	9.84	女性人口比例	+0.849
			≥65岁人口比例(%)	+0.570
4. 失业率	1.176	9.44	失业率	+0.831

第3和第4等级主要呈现出以第5和第6等级为中心向外发散的圈层结构,包括上海、江苏、河南、陕西、贵州和海南的部分县市;高温胁迫最低等级(第1和第2等级)主要分布在青藏高原和东北地区。其中处于高温胁迫高等级(等5和第6等级)的县域个数占全国县域个数的20.4%,全国广为熟知的火炉城市如重庆、武汉、南昌等均位于高胁迫等级区域。在第5和第6等级中占据县域个数最多的省份为浙江(68)、江西(66)、湖南(55)、广西(53)、福建(52)、湖北(42)六个省,占高胁迫等级区域县域个数比例为13.8%、13.4%、11.2%、10.8%、10.6%、8.5%。高温胁迫强度最大的县域主要集中在新疆维吾尔自治区和浙江省境内,其中,高温胁迫绝对值最大的为新疆阿克苏地区的沙雅县、新疆和田地区的洛浦县、新疆吐鲁番地区的鄯善县和吐鲁番市。

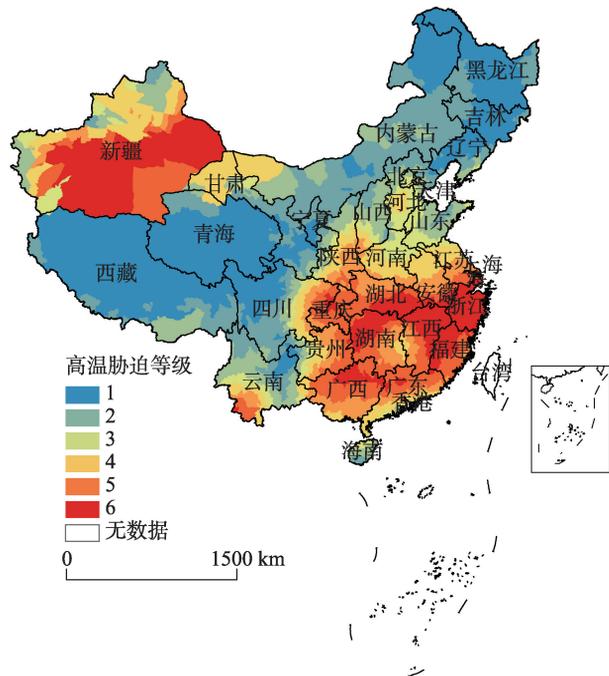


图3 中国夏季高温胁迫等级

Fig. 3 Heat stress level in China

社会脆弱性值由标准化的主成分得分表征,利用自然断点法将社会脆弱性划分为高、中、低三个等级(图4)。其中社会脆弱性高值区域主要位于中国西南地区,包括青藏高原、横断山脉、云贵高原东部、湘西渝东一带,部分分布于河南省与广西省,同时东北三省以及河北省北部也有零星分布。社会脆弱性高、中、低三个等级县域占比分别为33.7%、51.6%、14.7%,中等社会脆弱性分布最为广泛。高社会脆弱性区域共有县域812个,主要分布在四川(80)、河南(79)、贵州(68)、西藏(66)、河北(60)、云南(57)、甘肃(54)、广西(47)等地。以上区域社会脆弱性值较高主要是因为社会经

济水平较低、少数民族人口较多、幼儿比例较多、受教育水平较低、从事第一产业人口比例较高、以及社会适应能力较差所致。其中尤其以西藏地区高社会经济脆弱性最为突出,在社会经济脆弱性最高的前30个县域中,西藏占据了18个。然而,一些经济水平比较发达的地区也出现了社会脆弱性较高的现象,例如上海(静安区、卢湾区),广东省(深圳市南山区),这主要是由于这些区域老年人口比例、女性人口占比以及失业率较高的原因。社会经济脆弱性低值区含县域353个,主要集中在广东(48)、浙江(32)、内蒙古(26)、江苏(24)等地,这些区域整体而言社会经济发展状况较好,居民对于高温胁迫适应能力较强,同时也不存在显著的脆弱人群(如小孩、老人、女性、少数民族等)聚集。

高温脆弱性的计算由公式(1)得到,将其按照自然断点法由低到高分1~6六个等级(图5),其分别占据全国县域个数百分比为5.77%,9.26%,21.13%,24.28%,24.03%,15.53%。高温灾害脆弱性高值区主要集中在西北的新疆西部、华北的豫西北交界、西南四川盆地、华中洞庭湖流域、华南广西境内珠江流域。具体而言,在高温灾害脆弱性的高等级(第5、6等级)的县域主要集中在河南(106)、河北(91)、湖南(83)、广西(77)、江西(74)、四川(69)、安徽(60)等省。高温灾害脆弱性低等级区域主要集中在高温胁迫低或社会脆弱性低的区域。西藏、四川、内蒙古、青海、甘肃等省的区县高温胁迫较低,发生高温热浪灾害的可能性不大,因而具有较低的高温灾害脆弱性。而一些经济较为发达的区域,例如北京的海淀、石景山、丰台,广东的广州、深圳、东莞、佛山等市,福建的福州、泉州、厦门等市的市辖区,天津的津南、东丽、河北区以及滨海新区,上海松江、嘉定、闵行区等,虽然具有较高的高温胁迫等级,但是由于此类区域基础服务设施相对完善,社会福利与社会保障水平高,导致社会脆弱性较低,进而降低了高温灾害脆弱性。

3.2 高温灾害风险评价

基于高温胁迫、社会脆弱性与人口暴露,由公式(2)得到高温风险值,完成高温灾害风险制图,按照自然断点法分为1~6六个等级(图6),其分别占据县域个数比为45.99%、27.63%、16.48%、7.97%、1.74%、0.12%。风险较高区域主要集中在华中地区湖北江汉平原和湖南洞庭湖流域;西南地区四川省和重庆市交界处的四川盆地;华东地区江浙沪一带;华南珠江流域,特别是珠江三角洲地区。将高温灾害风险的前500个县域(约占全国县域总数20%)定义为高温灾害风险热点区域,按照省域来说高温灾害风险热点区域主要集中在湖南(62)、浙江(53)、广东(46)、湖北(41)、江苏(38)、四川(36)、江西(33)、重庆(30)等省。其中高温风险最高的30个县域分布具有一定的

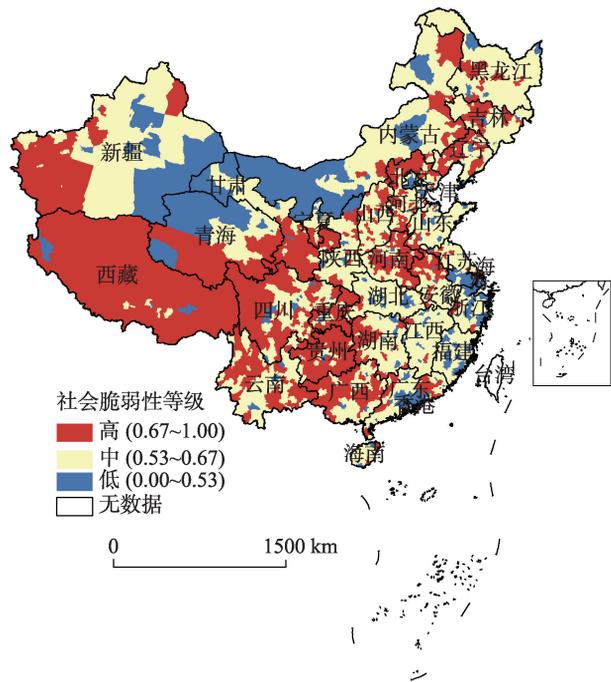


图4 中国社会脆弱性等级

Fig. 4 Social vulnerability level in China

集聚性(表3), 主要分布在中国江浙沪地区, 华中湖南、湖北、江西, 华南广东、广西省, 西南四川、重庆, 以及东部沿海地区。例如湖北武汉市市辖区、浙江杭州市市辖区、上海浦东新区、广东汕头市市辖区、江苏苏州市市辖区等。可见中国高温灾害风险热点区主要集中在广阔的平原、盆地区域以及大江大河流域的中心城市区域, 这些区域往往高温胁迫程度较高, 加之城市的发展和人口聚集使得人口暴露过高而造成较高的高温灾害风险。因此, 尽管大城市及周边地区受经济的带动作用社会脆弱性较低, 高温灾害脆弱性不明显, 但是并不能认为此类区域高温风险低; 恰恰相反, 由于大城市人口稠密, 暴露在高温胁迫下的人口远高于西部地区, 因而大城市如若遭遇高温灾害往往会造成较大损失。

3.3 高温灾害风险防范分区

风险防范分区是指进行风险防范的空间策略, 即在风险评价的基础上, 针对风险等级及其主导因子的差异, 划分风险因子主导区, 以期为针对性的风险防范策略提供指导^[35]。本研究中针对高温风险热点区域进行风险防范分区, 首先将高温胁迫因子和社会脆弱因子按照自然断点法分为高和低两个等级, 将高温胁迫高、社会脆弱性低的区域命名为高温胁迫主导区, 高温胁迫低、社会脆弱性高的区域命名为社会脆弱性主导区, 两者都高的区域命名为高温胁迫—社会脆弱性综合主导区, 两者都低的区域命名为人口暴露主导区。四个风险因子主导区所占县域个数百分比分别为23.2%, 26.0%, 42.2%和8.6%(图7)。其中高温胁迫主导区主要位于江浙沪交界处, 湖北中部以及广东珠三角区域; 社会脆弱性主导区主要位于江苏北部, 湖南西部, 贵州北部和四川盆地外围; 高温胁迫—社会脆弱性综合主导区主

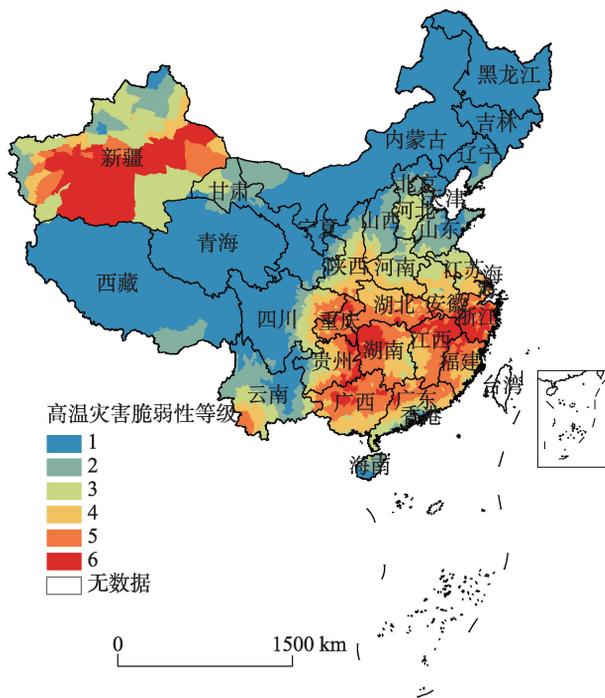


图5 中国高温灾害脆弱性分布

Fig. 5 Spatial pattern of heat stress vulnerability in China

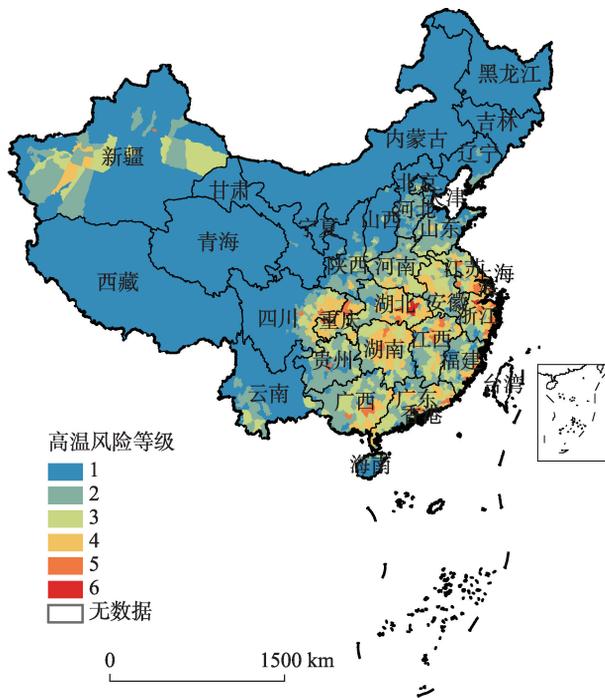


图6 中国高温灾害风险分布

Fig. 6 Spatial pattern of heat stress risk in China

要位于江浙沪交界处, 湖北中部以及广东珠三角区域; 社会脆弱性主导区主要位于江苏北部, 湖南西部, 贵州北部和四川盆地外围; 高温胁迫—社会脆弱性综合主导区主

表3 中国高温灾害风险最高的30个县域

Tab. 3 The top 30 counties with heat stress risk in China

排名	县域	所处省市	排名	县域	所处省市
1	武汉市市辖区	湖北武汉	16	南宁市市辖区	广西南宁
2	杭州市市辖区	浙江杭州	17	通州市	江苏南通
3	浦东新区	上海市	18	万州区	重庆市
4	汕头市市辖区	广东汕头	19	慈溪市	浙江宁波
5	苏州市市辖区	江苏苏州	20	长沙市市辖区	湖南长沙
6	温州市市辖区	浙江温州	21	闵行区	上海市
7	南京市市辖区	江苏南京	22	常德市市辖区	湖南常德
8	无锡市市辖区	江苏无锡	23	乐清市	浙江温州
9	台州市市辖区	浙江台州	24	莆田市市辖区	福建莆田
10	宁波市市辖区	浙江宁波	25	南充市市辖区	四川南充
11	南昌市市辖区	江西南昌	26	乌鲁木齐市市辖区	新疆乌鲁木齐
12	厦门市市辖区	福建厦门	27	丰城市	江西宜春
13	东莞市	广东东莞	28	福州市市辖区	福建福州
14	鄱阳县	江西上饶	29	温岭市	浙江台州
15	萧山区	浙江杭州	30	桂平市	广西贵港

要位于豫皖苏平原，四川盆地，广西西南以及湖北、湖南、江西等省；人口暴露主导区主要位于人口密集的中心城市以及东部沿海地区。

主导因子分区能够明确高温灾害风险的内在作用机制，在高温胁迫主导层面，可以从自然本底环境角度识别出夏季高温显著的区域；在社会脆弱性主导层面，能识别出由于自身生理条件或者社会经济条件而造成的对高温抵抗力较弱的脆弱人群分布；在人口暴露主导层面，能将脆弱性人群落到空间县域上，突出风险损失的量。根据不同的风险主导因子，可以针对性地制定高温灾害风险防范策略：针对高温胁迫主导区域来说，增加植被和绿地空间能够降低区域温度，可行方案如增加植被密度和行道树，进行屋顶绿化等；同时在城市规划时进行更为合理的考虑，如考虑建筑格局的通风情况等；除此之外要加强减灾防灾宣传，高温期间居民避免不必要的外出。对于社会脆弱性主导区域来说可以通过考虑减少脆弱性人群来实现风险减缓，例如妥善安置脆弱性人群，或者安装空调设备等。对于人口暴露主导区来说，降低人口密度并不是很现实，因此应该尽量考虑高温预警设施

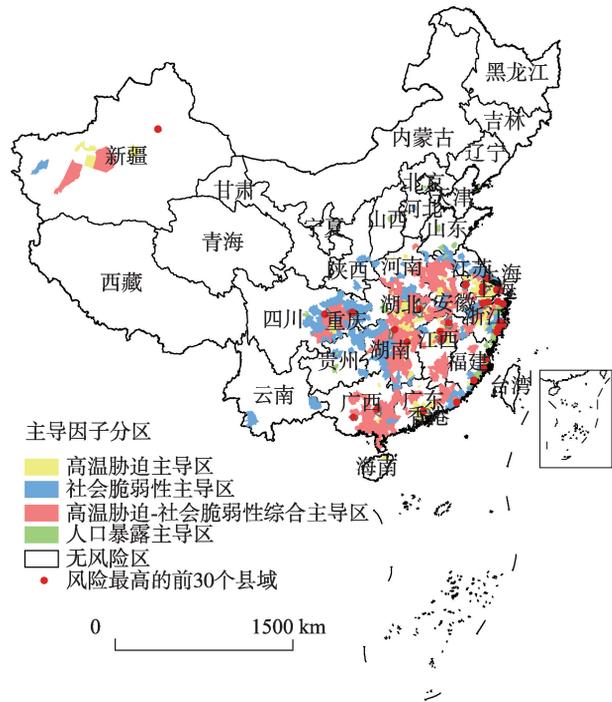


图7 中国高温风险主导因子分区

Fig. 7 Dominant factor partition of heat stress risk in China

的完备性以及灾害发生时人员疏散与管理的可行性。

4 结论与讨论

本文在气候变化风险评估概念框架的基础上提出了基于“高温胁迫—社会脆弱性—人口暴露”的高温灾害人群健康风险评价框架,结合气象数据、统计数据和遥感数据构建指标体系,实现了全国范围县域尺度的高温灾害人群健康风险评价,并进行了高温灾害风险热点区域识别和风险防范分区探究。研究表明,高温灾害脆弱性热点区域主要集中在我国西北新疆西部、华北豫西皖北交界处、西南四川盆地、华中洞庭湖流域、华南广西境内珠江流域;而华中地区湖北江汉平原和湖南洞庭湖流域、西南地区四川省和重庆市交界处的四川盆地、华东地区江浙沪一带、华南珠江流域(特别是珠江三角洲地区),则是中国突出的高温灾害风险热点区。高温灾害脆弱性热点区和高温灾害风险热点区的分布出现比较明显的差异,高温灾害脆弱性热点区主要分布于高温胁迫较高或社会经济较差的不发达地区,这些区域的人群由于经济上的适应能力较差而受到高温威胁的概率较大;而高温灾害风险强调灾害一旦发生时的可能损失,其热点区域主要分布于人口聚集、经济较为发达的大城市区域。在高温灾害风险评价的基础上针对风险主导因子差异进行的风险防范分区为更有针对性地提供风险防范策略提供了指导。风险主导因子分区结果表明,高温胁迫主导区域主要为平原、盆地以及大江大河流域,社会脆弱性主导区域主要位于经济欠发达地区以及脆弱性人群聚集区;人口暴露主导区域则主要集中在人口密集的沿海地区。

在概念模型上,本研究在前人关注高温胁迫空间分布和社会脆弱性空间分布的基础上,通过进一步强调人口暴露,构建了新的高温灾害人群健康风险评价框架,为高温灾害风险量化提供了一定的理论支撑。在实证案例上,本研究实现了全国范围的县域尺度的高温灾害脆弱性和高温灾害风险评价,进行风险热点区识别和主导因子分区,为全国范围内有针对性的高温预警、资源调配等风险防范措施提供科学指引。在精度控制上,本研究在传统研究省级尺度和市级尺度的基础上精确到县级尺度,有助于增强高温灾害风险规避的空间针对性。在进一步研究中,对于高温灾害风险防范的重点区域有必要综合环境数据、社会经济数据、调查访谈数据等展开更为精细的社区尺度风险评估^[17],关注减灾防灾措施实施和资源调配落实情况。除了空间尺度的进一步精细外,有必要探究高温灾害脆弱性和风险格局随着未来气候变化、城市化进程、人口增长等而产生的变化,对未来高温风险的情景模拟和预测将是高温灾害风险防范的重点议题^[19]。

参考文献(References)

- [1] Ge Shengquan, Zheng Jingyun, Hao Zhixin, et al. State-of-the-arts in the study of climate changes over China for the past 2000 years. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1248-1258. [葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去2000年中国气候变化研究的新进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1248-1258.]
- [2] Peng Jian, Liu Yanxu, Pan Yajing, et al. Study on the correlation between ecological risk due to natural disaster and landscape pattern-process: Review and prospect. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(10): 1186-1196. [彭建, 刘焱序, 潘雅婧, 等. 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. *地球科学进展*, 2014, 29(10): 1186-1196.]
- [3] IPCC. *Climate Change 2007. Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Semenza J C, Rubin C H, Falter K H, et al. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New England Journal of Medicine*, 1996, 335(2): 84-90.

- [5] Stott P A, Stone D A. Human contribution to the European heat wave of 2003. *Nature*, 2004, 432(7017): 610-614.
- [6] Patz J A, Campbell-Lendrum D. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 2005, 438(7066): 310-317.
- [7] Xu Xuegong, Yan Lei, Xu Lifan, et al. Ecological risk assessment of natural disasters in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 901-908. [许学工, 颜磊, 徐丽芬, 等. 中国自然灾害生态风险评价. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 901-908.]
- [8] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 1-10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. 地理学报, 2003, 58(1): 1-10.]
- [9] Shi Jun, Tang Xu, Cui Linli. Climatic characteristics of high temperature in East China during 1961-2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3): 283-294.
- [10] Li Zongxin, He Yuanqing, Theakstone W H, et al. Altitude dependency of trends of daily climate extremes in southwestern China, 1961-2008. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(3): 416-430.
- [11] Yang Xuan, Tang Xu, Chen Baode, et al. Impacts of heat stress on wheat yield due to climatic warming in China. *Progress in Geography*, 2013, 32(12): 1771-1779. [杨绚, 汤绪, 陈葆德, 等. 气候变暖背景下高温胁迫对中国小麦产量的影响. 地理科学进展, 2013, 32(12): 1771-1779.]
- [12] Yin Zhan'e, Yin Jie, Zhang Xiaowei. Multi-scenario-based hazard analysis of high temperature extremes experienced in China during 1951-2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(3): 436-446.
- [13] Hajat S, Armstrong B, Baccini M, et al. Impact of high temperatures on mortality: is there an added heat wave effect? *Epidemiology*, 2006, 17(6): 632-638.
- [14] O' Neill M S, Zanobetti A, Schwartz J. Modifiers of the temperature and mortality association in seven US cities. *American Journal of Epidemiology*, 2003, 157(12): 1074-1082.
- [15] Cutter S L, Boruff B J. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 2003, 84(2): 242-261.
- [16] 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, socioeconomic, and neighborhood stability. *Health and Place*, 2011, 17(2): 498-507.
- [17] Johnson D P, Stanforth A, Lulla V, et al. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data. *Applied Geography*, 2012, 35(1): 23-31.
- [18] Dong Siyan, Xu Ying, Zhou Botao, et al. Predicted risk of extreme heat in China based on CMIP5 Models. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climates*, 2014, 10(25): 365-369. [董思言, 徐影, 周波涛, 等. 基于CMIP5模式的中国地区未来高温灾害风险预估. 气候变化研究进展, 2014, 10(25): 365-369.]
- [19] Vescovi L, Rebetez M, Rong F. Assessing public health risk due to extremely high temperature events: Climate and social parameters. *Climate Research*, 2005, 30(1): 71-78.
- [20] Aubrecht C, Özceylan D. Identification of heat risk patterns in the US National Capital Region by integrating heat stress and related vulnerability. *Environment International*, 2013, 56: 65-77.
- [21] IPCC. *Climate Change 2014. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [22] Gong Daoyi, Han Hui. Extreme climate events in northern China over the last 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 230-238. [龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报, 2004, 59(2): 230-238.]
- [23] Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962-2011. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 612-625. [王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962-2011年长江流域极端气温事件分析. 地理学报, 2013, 68(5): 612-625.]
- [24] Heaton M J, Sain S R, Greasby T A, et al. Characterizing urban vulnerability to heat stress using a spatially varying coefficient model. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 2014, 8: 23-33.
- [25] Wilhelmi O V, Hayden M H. Connecting people and place: A new framework for reducing urban vulnerability to extreme heat. *Environmental Research Letters*, 2010, 5: 014021.
- [26] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A framework for the development of the SERV model: A spatially explicit resilience-vulnerability model. *Applied Geography*, 2014, 51: 158-172.
- [27] Reid C E, O'Neill M S, Gronlund C J, et al. Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117(11): 1730-1736.
- [28] Rinner C, Patychuk D, Bassil K, et al. The role of maps in neighborhood-level heat vulnerability assessment for the city of Toronto. *Cartography and Geographic Information Science*, 2010, 37(1): 31-44.
- [29] Xu Shiyuan, Wang Jun, Shi Chun, et al. Research of the natural disaster risk on coastal cities. *Acta Geographica Sinica*,

- 2006, 61(2): 127-138. [许世远, 王军, 石纯, 等. 沿海城市自然灾害风险研究. 地理学报, 2006, 61(2): 127-138.]
- [30] El-Zein A, Tonmoy F N. Assessment of vulnerability to climate change using a multi-criteria outranking approach with application to heat stress in Sydney. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 207-217.
- [31] Ebert U, Welsch H. Meaningful environmental indices: A social choice approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2004, 47(2): 270-283.
- [32] 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. [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. 地理科学进展, 2015, 34(2):165-174.]
- [33] Liu Zhihong, Li Lingtao, McVicar T R, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(2): 92-100. [刘志红, Lingtao L, Tim R. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用. 气象, 2008, 34(2): 92-100.]
- [34] Qian Yonglan, Lv Houquan. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on ANUSPLIN software. *Journal of Meteorology and Environmental*, 2010, 26(2): 7-15. [钱永兰, 吕厚荃. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估. 气象与环境学报, 2010, 26(2): 7-15.]
- [35] Chang Qing, Liu Dan, Liu Xiaowen. Ecological risk assessment and spatial prevention tactic of land destruction in mining city. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(20): 245-254. [常青, 刘丹, 刘晓文. 矿业城市土地损毁生态风险评价与空间防范策略. 农业工程学报, 2013, 29(20): 245-254.]

Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China

XIE Pan, WANG Yanglin, LIU Yanxu, PENG Jian

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

Abstract: This paper presented a new conceptual framework by taking account of heat stress, social vulnerability, and population exposure. Meanwhile, an index system combining environmental data, demographics data and socioeconomic data has been built for the quantitative assessment of county-level heat stress risk pattern of China. The counties with the greatest vulnerability scores contain the Tarim Basin in Northwest China, Yudong Plain and Huaibei Plain in North China, Sichuan Basin in Southwest China, Jiangnan Plain and Dongting Lake Basin in Central China, and Pearl River Basin in South China. The hot spots of heat stress risk are located in Jiangnan Plain and Dongting Lake Basin in Central China, Sichuan Basin in Southwest China, the junction of Jiangsu, Zhejiang and Shanghai in East China, and Pearl River Basin in South China, especially the Pearl River Delta Region. The hot spots of vulnerability are located in counties of high heat stress or high social vulnerability level, while the hot spots of risk mainly consist of metropolitan areas with dense population and advanced economic level. The results of dominant factor partition show that heat stress dominant areas are mainly located in basins or plains which are more prone to high temperature, social vulnerability dominant areas are mainly located in less developed counties, and population exposure dominant areas are mainly located in coastal counties with dense population.

Keywords: heat related risk; population health; heat stress; social vulnerability; dominant factor partition