

中国城市高温特征及社会脆弱性评价

黄晓军^{1,2,3,4}, 王博¹, 刘萌萌¹, 郭禹慧¹, 李艳雨¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;
3. 西北大学地表系统与灾害研究院, 西安 710127; 4. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站,
西安 710127)

摘要: 极端高温对人类健康与城市社会发展影响显著, 如何衡量城市高温特征及其社会后果是地理学人地关系研究的新命题。将社会脆弱性分析工具应用到该命题研究中, 以中国 296 个城市为研究对象, 采集各城市日最高气温数据、社会经济统计数据 and 人口普查数据, 建立了高温日数、高温强度、热浪频次、热浪持续时间和热浪强度等表征城市高温特征的量化指标, 对 1960—2016 年中国主要城市高温特征进行了系统分析; 基于城市高温社会脆弱性分析框架, 从暴露度、敏感性和适应能力 3 个维度构建中国城市高温社会脆弱性评价指标体系, 并开展社会脆弱性评价, 划分社会脆弱性等级, 分析城市社会脆弱性致脆原因。结果表明: ① 中国极端高温和热浪事件的分布主要集中在南方城市, 尤其是在华东和华中地区, 尽管北方城市高温热浪事件较少, 但高温强度较为突出。② 中国城市高温暴露度指数具有明显的空间集聚特征, 而各城市的敏感性指数和适应能力指数分布较为分散。③ 中国高社会脆弱性指数城市主要集中在华东和华中大部分地区, 以及西南和华北部分地区; 高、中、低社会脆弱性指数城市比例分别为 25.3%、46.3% 和 28.4%。④ 社会敏感致脆型城市数量最多 (46.9%), 其次为高温暴露致脆型 (44.3%), 适应能力不足致脆型城市数量最少 (8.8%), 在高社会脆弱性城市中, 暴露度指数贡献度最大, 中、低社会脆弱性城市中敏感性指数贡献度最大, 适应能力指数对城市高温社会脆弱性的贡献度较小。本研究可在灾害-社会关系研究、城市高温特征的量化表达与高温社会脆弱性评价等方面提供借鉴和启示。

关键词: 城市高温; 社会脆弱性; 评价; 暴露; 敏感性; 适应

DOI: 10.11821/dljy020190608

1 引言

受全球气候变化影响, 近年来极端天气事件频发, 对人类福祉构成严重威胁^[1]。2017—2020 年全球风险报告表明, 极端天气事件已成为人类社会面临的最突出风险^[2], 且研究显示, 未来全球以及中国极端天气事件发生频率将更高, 持续时间会更长, 给人类社会带来的脆弱性后果也将更加严重^[3, 4]。减缓极端天气灾害风险、适应未来气候变化、建设气候安全型社会已成为当今全人类面临的重大现实挑战。

在所有极端天气事件中, 极端高温发生概率高、影响范围广、风险危害大。然而, 极端高温的脆弱性后果在空间上的分布并不均衡。1997 年美国芝加哥热浪事件和 2003 年欧洲热浪事件均表明, 极端高温产生的脆弱性后果并不仅仅取决于灾害本身, 还与所在

收稿日期: 2019-07-18; 修订日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971178); 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室开放基金项目 (SKLESS 201807)

作者简介: 黄晓军 (1983-), 男, 黑龙江哈尔滨市人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为人地系统脆弱性与恢复力。E-mail: huangxj@nwu.edu.cn

地理空间的物质环境、人口特征、社会结构、收入水平等人文因素密切相关^[5-7]。对此, 如何理解极端高温灾害的社会后果, 量化其在空间上的属性差异, 并揭示其空间分异格局, 是亟需回答的重要科学问题。

社会脆弱性研究为回答这一问题提供了一个重要的分析框架。社会脆弱性多被理解为暴露于环境压力下的社会系统, 由于自身的敏感性和缺乏对不利扰动的适应能力而使其受到的损害状态^[8-10]。与灾害脆弱性主要关注灾害本身及其导致的生物物理损失相比, 社会脆弱性更为关注人和社会在脆弱性形成中的作用^[11], 不仅考虑外部环境变化的影响, 还强调社会系统内部固有或潜在的脆弱属性的重要作用(如贫困、不平等、边缘化等)^[12], 侧重探讨导致人类社会容易受到环境影响的政治、经济、制度和和文化因素以及提高社会系统恢复力的人文机制和对策^[13-16]。在极端天气事件愈发频繁, 且灾害因子难以控制而人文因素可调节的现实背景下, 社会脆弱性研究也为通过社会结构调整以适应气候变化提供了新的思路^[17-20]。

西方学者较早关注到极端高温对人类健康与社会经济的影响, 采用脆弱性分析工具, 开展高温脆弱性评估, 制作高温脆弱性地图。这项研究已成为该领域的热点, 其重要性也得到了学者们的广泛认同, 即高温脆弱性评估可为制定有针对性的减缓与适应对策提供重要依据, 是科学与政策间的桥梁^[21]。相关研究多基于人口普查、社区调查和住房调查等数据构建指标体系, 采用主成分分析、综合指数等方法提取脆弱性因子或综合加权求得脆弱性指数, 进而在空间上进行可视化, 揭示极端高温的脆弱性格局及其社会分异^[22-27]。近年来, 中国地理学领域也开始关注极端高温下的社会风险及其脆弱性评估^[28-32], 典型成果如谢盼等基于社会脆弱性对中国高温灾害人群健康风险进行的评价^[28], 税伟等对福州市高温脆弱性的评估^[33]。对比国内外研究成果可以发现, 西方在极端高温的社会脆弱性评估方面具有起步早、研究成果丰富、研究尺度详细、学科多元化等特点, 但在社会脆弱性评估框架与方法体系的理论建构方面有待提高, 且脆弱性评估指标多偏重于人口属性和社会特征, 从高温暴露、社会敏感性和适应能力的综合评估研究不够。与西方相比, 中国城市极端高温的社会脆弱性研究起步晚, 研究成果有限, 实证案例与理论总结不足。

基于此, 本文通过对城市高温社会脆弱性概念与内涵的解析, 从暴露度、敏感性和适应能力3个维度构建了城市高温社会脆弱性分析框架与评价指标体系, 同时, 建立了表征城市高温特征的量化指标, 在此基础上, 对1960—2016年中国296个城市高温时空演化特征进行了系统分析, 并对各城市高温社会脆弱性进行了评价, 识别了城市高温社会脆弱性致脆原因与类型。本研究可在城市高温特征的量化表达、高温社会脆弱性的评价方法等方面提供借鉴和启示, 同时对制定具有针对性的城市高温社会脆弱性减缓与治理对策具有重要意义和价值。

2 研究区域、数据与方法

2.1 研究区域与数据来源

考虑到研究数据的可获得性, 本文主要以中国4个直辖市和292个地级市为研究区域(受数据资料所限, 本文研究区域不包括台湾、香港特别行政区、澳门特别行政区和2012年新成立的三沙市), 共计296个市域空间单元。

本文的气温数据来源于中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)上的中国地面气候资料日值数据集(V3.0), 采集了1960—2016年所有国家气象站的逐日最高气温数

据,并在每个城市范围内,选取了一个国家气象站作为该城市气温数据的主要来源。其中,有23个城市没有国家气象站或部分年份数据缺失,对此,采用邻近城市的国家气象站数据进行替代,最终,共采集了1960—2016年全国273个国家气象站的逐日最高气温数据(见图1)。用于高温社会脆弱性评价的数据为市域范围,主要来源于《中国城市统计年鉴-2017》和各城市第六次人口普查数据。

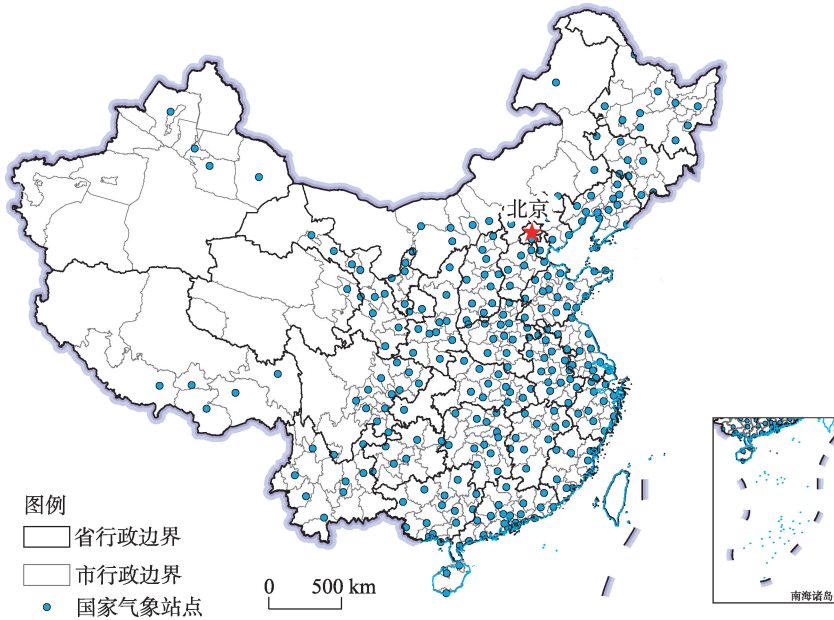


图1 中国主要城市及国家气象站点分布

Fig. 1 Distribution of main cities and national meteorological stations in China

注:此图基于国家测绘地理信息局标准地图(审图号:GS(2019)1825)绘制,底图无修改。

2.2 城市高温特征解析

高温的界定尚无统一标准,目前主要有单要素和多要素两种方法。单要素以气温为主,如中国气象局将日最高气温达到或超过 35°C 时称为高温,连续3天以上的高温天气过程称为高温热浪;多要素综合了多个指标,如美国、加拿大根据气温、相对湿度等对人体的影响提出了高温指数^[34]。

本文主要采用中国气象局的界定标准,来识别1960—2016年中国各城市高温及热浪事件。通过构建高温日数、高温强度、热浪频次、热浪持续时间和热浪强度等指标对各城市高温特征进行分析(见表1),其中,高温日数指日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数;高温强

表1 城市高温热浪特征指标

Tab. 1 Index of urban high temperature and heat wave

| 高温指标 | 单位 | 指标释义 |
|--------|--------------------|---|
| 高温日数 | 天 | 日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数 |
| 高温强度 | $^{\circ}\text{C}$ | 高温日($\geq 35^{\circ}\text{C}$)的最高气温平均值 |
| 热浪频次 | 次 | 高温热浪事件(连续3天 $\geq 35^{\circ}\text{C}$)发生的次数 |
| 热浪持续时间 | 天 | 高温热浪过程持续的总天数 |
| 热浪强度 | $^{\circ}\text{C}$ | 高温热浪过程中日最高气温超过高温阈值(35°C)的累积数(气温累积值) |

度指高温日的最高气温平均值;热浪频次指高温热浪事件发生的次数;热浪持续时间指高温热浪过程持续的总天数;热浪强度是指高温热浪过程中日最高气温超过高温阈值(35℃)的累积数(气温累积值)。各城市高温特征可通过1960—2016年上述高温指标的累计值和年均值进行定量表达。

2.3 城市高温社会脆弱性评价

2.3.1 高温社会脆弱性分析框架

城市高温社会脆弱性指暴露于极端高温下的城市社会系统,由于系统结构差异和缺乏对极端高温天气的适应能力而受到的负面影响。

在城市高温社会脆弱性分析框架中(见图2),外部扰动主要是极端高温事件,暴露度反映了城市受极端高温扰动的程度,可以通过表1中的强度、频率、持续时间等高温热浪特征指标来衡量。城市中的不同要素系统(经济、社会、基础设施等)都会受到极端高温天气的影响,而受其影响最直接和最显著的主要是人口,但

由于城市人口规模不同,各城市暴露于高温扰动的概率有所差异。同时,不同人口受高温影响的差异还与其内在结构特征密切相关,由于身体调节能力相对较弱,老年人和儿童受高温天气影响更显著^[35];户外工作人员由于长时间暴露于室外,同样受高温天气影响较大,因此,人口的年龄结构和职业结构是人口对高温敏感性差异的主要体现。适应能力反映城市应对和适应极端高温天气的能力水平,可通过城市的经济能力、医疗水平、降温设施和获取信息能力等指标进行衡量。暴露度和敏感性构成了潜在的社会脆弱性,适应能力对其具有抵消作用,三者共同反映了实际的社会脆弱性。

2.3.2 高温社会脆弱性评价指标体系

根据高温社会脆弱性概念内涵和分析框架,参考已有研究成果^[8,9],可以发现,暴露度、敏感性和适应能力是理解和评估高温社会脆弱性的3个核心维度,高温社会脆弱性是上述3个维度的综合函数。因此,本文主要围绕这3个维度选取相应的替代性指标,建立城市高温社会脆弱性评价指标体系(见表2)。

暴露度指标选取了高温日数、高温强度、热浪频次、热浪持续时间和热浪强度来反映城市受到高温干扰的程度,采用常住人口数量反映城市人口受到高温干扰的概率。采用65岁以上人口比例和5岁以下人口比例分别反映城市老年人和儿童的敏感性状态。警察(交警)、清洁工、快递员、建筑工人等都属于户外工作群体,受数据所限,本文主要采用建筑业从业人口比例来反映城市户外工作人员的敏感性状态。

在适应能力维度中,受教育程度可以反映人口对高温灾害的认知水平以及应对能力,具体指标采用初中以上学历人口比例进行衡量;家庭内是否有降温设备以及降温设备的数量往往取决于家庭收入情况,因此采用居民家庭人均可支配收入和失业率2个指标来衡量;每万人病床数和每万人医生数量可以反映一个城市的医疗水平,是从健康保障方面衡量适应高温灾害能力的替代性指标;采用移动电话用户比例来反映城市人口获取高温预警信息的能力;住房内有洗澡设施户比例是衡量城市家庭降温设施的另一指标,而人均供水量反映了城市应对高温的设施水平;城市热岛效应与下垫面密切相关,绿地具有降温和缓解热岛效应的显著作用^[36],因此,采用人均绿地面积来衡量城市降温设施水平。

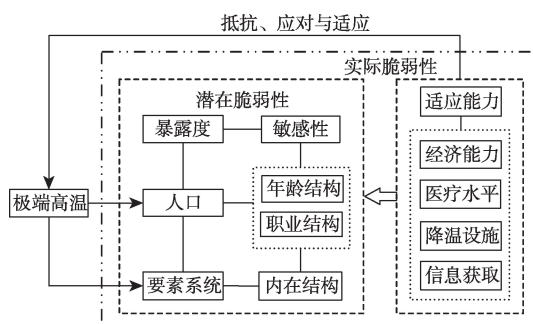


图2 城市高温社会脆弱性分析框架

Fig. 2 The analytical framework of urban social vulnerability to heat wave

表2 城市高温社会脆弱性评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of urban social vulnerability to heat wave

| 目标层 | 维度层 | 指标层 | 指标权重 | 指标释义 |
|---------|------|-----------------------------|--------|---|
| 高温社会脆弱性 | 暴露度 | 高温日数 (天) | 0.1706 | 日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数 |
| | | 高温强度 ($^{\circ}\text{C}$) | 0.0179 | 高温日的最高气温的平均值 |
| | | 热浪频次 (次) | 0.1841 | 高温热浪事件发生的次数 |
| | | 热浪持续时间 (天) | 0.2314 | 高温热浪过程持续的总天数 |
| | | 热浪强度 ($^{\circ}\text{C}$) | 0.3050 | 热浪过程中日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的气温累积数 |
| | 敏感性 | 常住人口 (万人) | 0.0910 | 暴露于极端高温的人口规模 |
| | | 5岁以下人口比例 (%) | 0.1782 | 反映儿童的敏感特征 |
| | | 65岁以上人口比例 (%) | 0.1178 | 反映老年人口的敏感特征 |
| | 适应能力 | 建筑业从业人口比例 (%) | 0.7040 | 反映户外工作人员的敏感特征 |
| | | 初中以上学历人口比例 (%) | 0.0964 | 人口高温认知水平和应对能力的替代指标 |
| | | 居民家庭人均可支配收入 (元) | 0.0350 | 家庭是否有降温设备及其数量的替代指标 |
| | | 失业率 (%) | 0.0157 | 家庭是否有降温设备及其数量的替代指标 |
| | | 每万人病床数 (张) | 0.0647 | 应对高温灾害健康保障水平的替代指标 |
| | | 每万人医生数量 (人) | 0.1198 | 应对高温灾害健康保障水平的替代指标 |
| | | 移动电话用户比例 (%) | 0.0503 | 人口获取高温预警信息能力的替代指标 |
| | | 住房内有洗澡设施户比例 (%) | 0.1397 | 家庭是否有降温设施的替代指标 |
| | | 人均供水量 (m^3) | 0.1913 | 城市应对高温的设施水平的替代指标 |
| | | 人均绿地面积 (m^2) | 0.2871 | 城市应对高温的设施水平的替代指标 |

2.3.3 数据处理与评价方法 为消除各指标间的量纲、量级和性质差异的影响,采用极差标准化方法对原始数据进行标准化处理。正向指标标准化公式为:

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

负向指标标准化公式为:

$$Y_{ij} = (X_{j\max} - X_{ij}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 、 $X_{j\max}$ 、 $X_{j\min}$ 和 Y_{ij} 分别为第 i 研究对象第 j 指标的原始值、最大值、最小值和标准化值。为减少评价者的主观性,采用熵值法计算并得到各指标权重系数(表2)。

本文综合采用函数模型法和综合指数法构建城市高温社会脆弱性评估模型,原因在于其能较好地体现社会脆弱性构成维度之间的相互作用关系,同时计算过程相对简便,易于操作^[16]。模型表达式为:

$$SoVI = EI + SI - AI \quad (3)$$

式中: $SoVI$ 为城市高温社会脆弱性指数; EI 、 SI 、 AI 分别为暴露度指数、敏感性指数和适应能力指数。暴露度与敏感性之和代表了潜在的社会脆弱性,具有正向作用,适应能力则对其具有抵消作用,三者共同反映了评价单元的实际社会脆弱性,各指数通过加权求和法计算得出。

为了进一步衡量暴露度、敏感性和适应能力3个维度对城市高温社会脆弱性的影响,判别城市高温社会脆弱性的致脆原因,在计算暴露度指数、敏感性指数和适应能力指数基础上,构建各指数对高温社会脆弱性的贡献度模型,以量化暴露度、敏感性和适应能力对高温社会脆弱性的贡献程度,计算公式为:

$$C_{ij} = W_j \times I_{ij} / \sum_{j=1}^3 W_j \times I_{ij} \times 100\% \quad (4)$$

式中: C_{ij} 表示第*i*个城市3个维度(暴露度、敏感性、适应能力)的贡献度; W_j 表示暴露度指数、敏感性指数和适应能力指数的权重,通过熵值法来确定; I_{ij} 为第*i*个城市3个维度指数的标准化值。

3 结果分析

3.1 中国城市高温特征

3.1.1 高温日数 识别并统计1960—2016年各城市日最高气温超过35°C的天数,得到中国各城市57年的累计高温日数和年均高温日数(见图3)。结果显示,57年间累计高温日数超过2000天以上的有12个城市,从大到小依次为吐鲁番、三明、丽水、鹰潭、百色、南平、上饶、衡阳、吉安、赣州、哈密、梅州,其中,吐鲁番的累计高温日数高达5760天;1000~2000天的有67个城市。从年均高温日数来看,30天以上的城市有23个,吐鲁番最高,年均高温日数高达101天;20~30天的有38个城市。从空间分布来看,高温日数较高的城市主要集中在中国南方,尤其是华东西部、华中东部、华南和西南地区的部分城市,北方地区主要分布在新疆的吐鲁番、哈密、克拉玛依,以及关中平原地区部分城市。

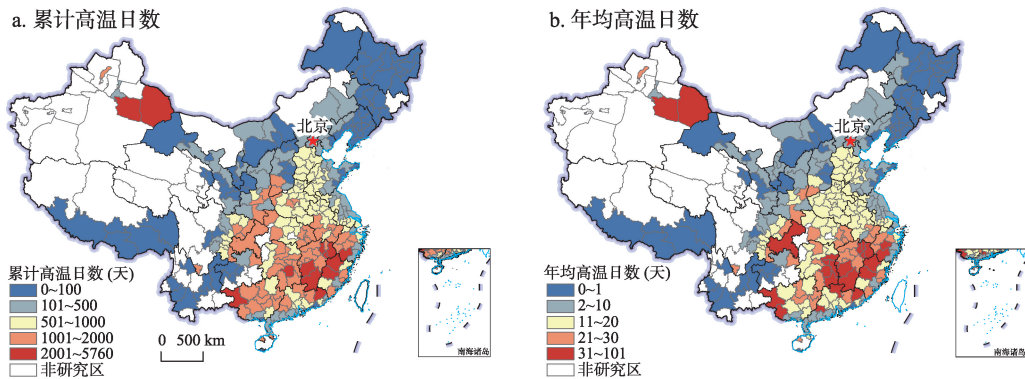


图3 1960—2016年中国主要城市高温日数

Fig. 3 Days of urban high temperature in China from 1960 to 2016

注: 此图基于国家测绘地理信息局标准地图(审图号: GS(2019)1825)绘制,底图无修改。

3.1.2 热浪频次 根据中国气象局对高温热浪的界定,对1960—2016年中国主要城市的热浪事件进行识别和统计(见图4)。结果显示,57年间有116个城市高温热浪事件累计发生次数超过了100次,其中,32个城市超过了200次,4个城市(吐鲁番、三明、百色、丽水)超过了300次,吐鲁番最高,达到412次。从年均热浪发生频次来看,年均3次以上的有54个城市,其中,4次以上的有20个城市,5次以上的有4个城市,分别为吐鲁番、三明、百色、丽水。总体来看,除新疆的吐鲁番和哈密以外,高温热浪事件主要集中在中国南方各城市,尤其是在华东南部和华中东部形成了热浪分布集中区;北方地区的高温热浪事件主要集中在关中平原和华北地区南部的少数城市。

3.1.3 热浪持续时间 在识别各城市高温热浪事件基础上,对1960—2016年各城市高温热浪过程的累计持续天数和年均持续天数分别进行计算(见图5)。结果显示,累计热浪

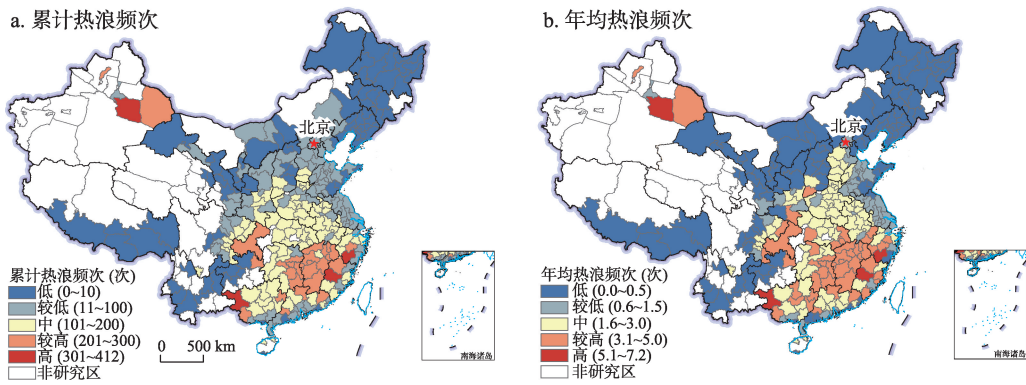


图4 1960—2016年中国主要城市热浪频次

Fig. 4 Frequency of urban heat waves in China from 1960 to 2016

注：此图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号：GS（2019）1825）绘制，底图无修改。

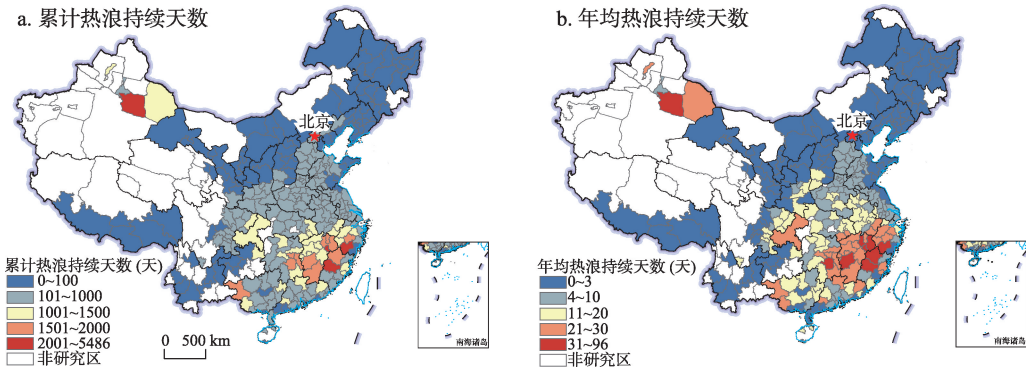


图5 1960—2016年中国主要城市热浪持续时间

Fig. 5 Duration of urban heat wave in China from 1960 to 2016

注：此图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号：GS（2019）1825）绘制，底图无修改。

持续时间在1000天以上的有45个城市，其中，1500~2000天的有10个城市，分别为上饶、南平、衡阳、吉安、金华、赣州、百色、株洲、湘潭、景德镇，2000天以上的有4个城市，包括吐鲁番、丽水、三明、鹰潭，吐鲁番最高，热浪持续天数高达5486天。从年均热浪持续天数来看，年均20天以上的有39个城市，其中，30天以上的有8个城市，包括吐鲁番、丽水、三明、鹰潭、上饶、南平、衡阳、吉安，吐鲁番的年均热浪持续时间高达96天。

3.1.4 高温与热浪强度 分别对1960—2016年所有城市高温日的平均最高气温和热浪期间日最高气温超过高温阈值的累积数进行统计计算，得出中国各城市的高温强度和热浪强度（见图6）。结果显示，最高级的高温强度城市有7个，依次为吐鲁番（39.2℃）、泸州（37.1℃）、哈密（37.0℃）、丽水（37.0℃）、重庆（37.0℃）、克拉玛依（36.9℃）和朝阳（36.9℃）；同时可以发现，尽管中国北方城市高温日数和热浪频次相对南方地区较少，但高温强度明显较高。从1960—2016年中国各城市累计热浪强度来看，2000℃以上的有26个城市，其中，3000℃以上的有10个城市，分别为吐鲁番、丽水、三明、鹰潭、上饶、哈密、重庆、衡阳、金华、吉安，吐鲁番高达24053℃，远超排在第二的丽水（4806℃）。

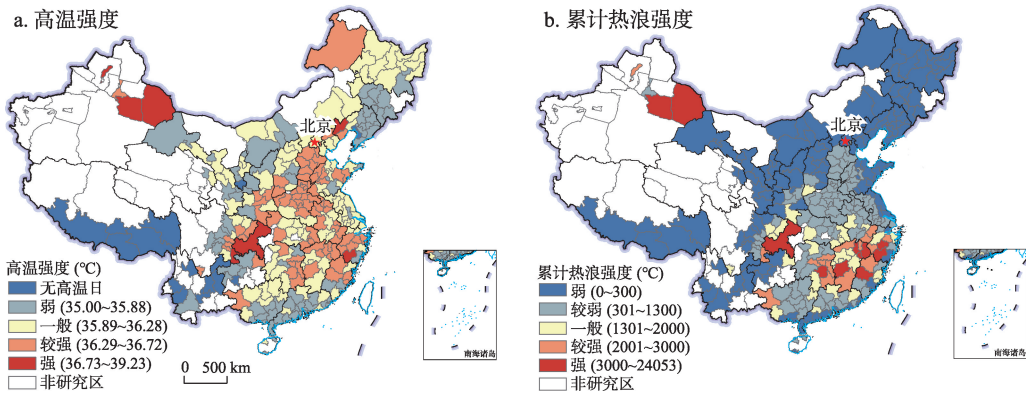


图6 1960—2016年中国主要城市高温和热浪强度

Fig. 6 Urban high temperature and heat wave intensity in China from 1960 to 2016

注：此图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号：GS（2019）1825）绘制，底图无修改。

3.2 中国城市高温社会脆弱性

3.2.1 高温社会脆弱性分异格局 分别计算中国各城市高温暴露度指数、敏感性指数和适应能力指数，将结果代入公式（3）计算得出中国主要城市的高温社会脆弱性指数，采用自然断点方法将其划分为高、中、低3个等级，进而得出各城市3个维度指数以及高温社会脆弱性的空间分异结果（见图7）。

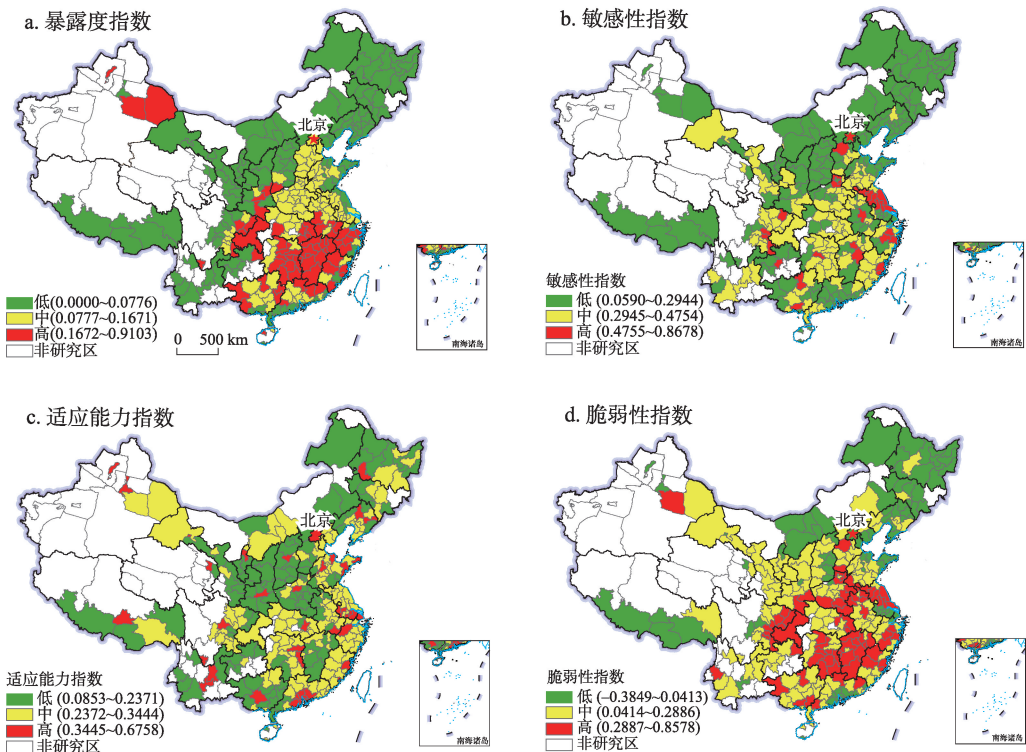


图7 中国城市高温暴露度、敏感性、适应能力和社会脆弱性指数分布

Fig. 7 The index distribution of exposure, sensitivity, adaptive capacity and social vulnerability to heat wave in China

注：此图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号：GS（2019）1825）绘制，底图无修改。

从各城市暴露度指数的分布来看，不同等级指数的空间集聚特征较为显著。高暴露度指数城市主要集中分布在华东和华中地区，包括江西全境，福建的内陆地区（如三明、南平、福州、莆田、漳州），浙江西南（丽水、金华、杭州、衢州、宁波、绍兴），安徽南部（宣城、黄山、安庆、六安），湖南东部（长沙、株洲、湘潭、衡阳、娄底、郴州、常德、益阳、永州），湖北东部（武汉、黄冈、黄石、咸宁）。此外，重庆、四川、广西、广东、陕西、新疆等部分城市的高温暴露度指数也较高。中、低暴露度指数城市的分布同样形成了相对集聚的态势，低暴露度指数城市主要集中在东北、西北、西南地区以及部分沿海地区；中暴露度指数城市主要分布在中部地区。总体来看，中国城市高温暴露度指数呈现出由北向南、自西向东逐渐增加的趋势。

从各城市的敏感性指数和适应能力指数分布来看，高敏感性指数和高适应能力指数城市的分布都比较分散，并没有表现出显著的空间集聚特征。中敏感性指数城市的分布相对集中在中部地区，而低敏感性指数城市分布主要集中在东北、内蒙古、西藏等地；中适应能力指数城市的分布主要在东部沿海、中部和西南部分地区，低适应能力指数城市的分布主要集中在东北、华北、关中、西南等地，其空间分布相对也较为分散。

综合了3个维度的城市高温社会脆弱性指数空间分布集聚特征较为显著，高、中、低社会脆弱性指数城市比例分别为25.3%、46.3%和28.4%。其中，低社会脆弱性指数城市主要分布在中国北方，包括东北地区 and 内蒙古，以及青藏高原和部分沿海城市；高社会脆弱性指数城市主要分布在中国南方，包括华东（福建、江西、浙江、江苏、安徽）、华中（湖南、湖北、河南）、西南（重庆、四川）、华南部分地区，以及华北地区南部（河北）；中社会脆弱性指数城市分布广泛，各区域均有分布。

3.2.2 高温社会脆弱性致脆类型 为了衡量暴露度、敏感性和适应能力3个维度对城市高温社会脆弱性的影响，根据公式（4）分别计算中国各城市暴露度指数、敏感性指数和适应能力指数对高温社会脆弱性指数的贡献度，通过比较确定各城市高温社会脆弱性的致脆原因和类型，包括高温暴露致脆型、社会敏感致脆型和适应能力不足致脆型3种类型（见图8，图9）。

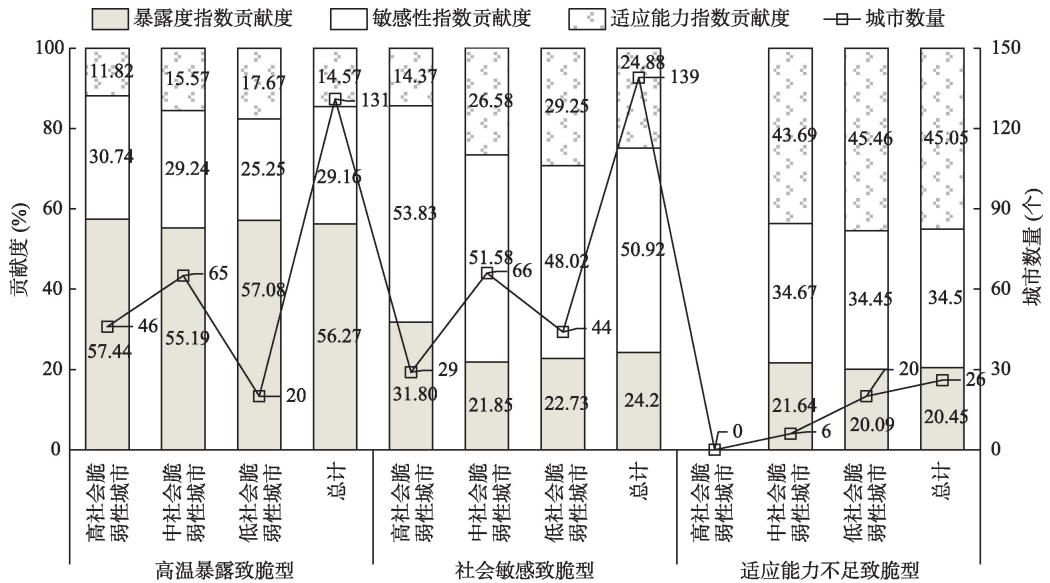


图8 城市高温社会脆弱性致脆类型及指数贡献度

Fig. 8 The types and index contribution degree of urban social vulnerability to heat wave

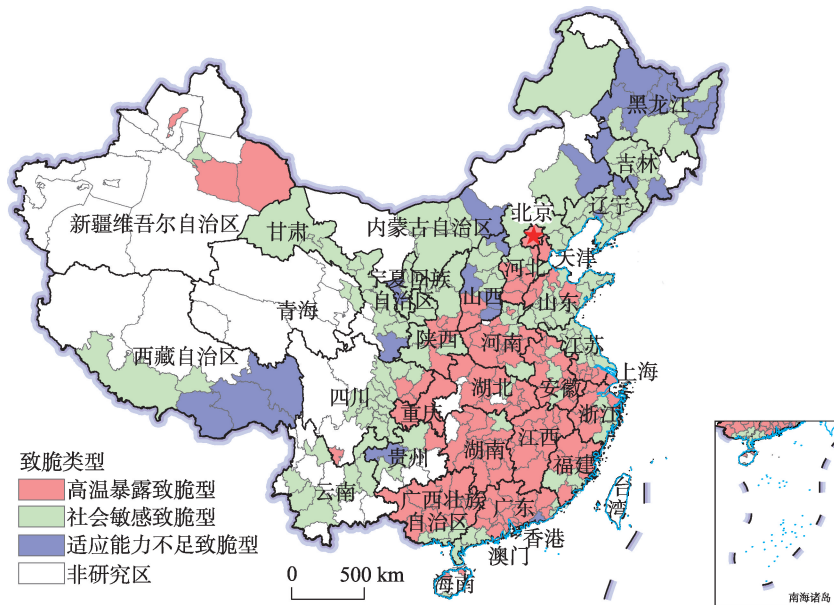


图9 中国城市高温社会脆弱性的致脆类型分布

Fig. 9 Distribution of urban social vulnerability types to heat wave in China

注: 此图基于国家测绘地理信息局标准地图(审图号: GS(2019)1825)绘制, 底图无修改。

总体来看, 社会敏感致脆型城市数量最多, 总计 139 个, 占全部城市总数的 46.9%; 高温暴露致脆型次之, 总计 131 个, 占比 44.3%; 适应能力不足致脆型城市数量最少, 只有 26 个, 仅占全部城市总数的 8.8%。从不同等级高温社会脆弱性城市来看, 75 个高社会脆弱性城市中, 有 46 个高温暴露致脆型, 29 个社会敏感致脆型; 137 个中社会脆弱性城市中, 有 65 个高温暴露致脆型, 66 个社会敏感致脆型和 6 个适应能力不足致脆型; 84 个低社会脆弱性城市中, 有 20 个高温暴露致脆型, 44 个社会敏感致脆型和 20 个适应能力不足致脆型。此外, 通过计算每类城市三个指数各自的贡献度均值可以发现, 高社会脆弱性城市中, 暴露度指数贡献度最大, 中、低社会脆弱性城市中敏感性指数贡献度最大(见表 3)。

表 3 各类社会脆弱性城市三个指数贡献度均值

Tab. 3 Average contribution of three indexes of different social vulnerable cities

| 脆弱性城市类型 | 暴露度指数贡献度均值 | 敏感性指数贡献度均值 | 适应能力指数贡献度均值 |
|----------|------------|------------|-------------|
| 高社会脆弱性城市 | 47.53 | 39.67 | 12.80 |
| 中社会脆弱性城市 | 37.66 | 40.24 | 22.10 |
| 低社会脆弱性城市 | 30.28 | 39.37 | 30.35 |

从空间分布来看, 高温暴露致脆型城市的空间集聚趋势最为显著, 而社会敏感致脆型和适应能力不足致脆型城市的分布相对分散, 绝大多数高温暴露致脆型城市集中分布在中国南方地区, 尤其是华东、华中和华南大部分地区以及西南小部分地区, 此外, 中国北方的华北地区及中国中部等地也有分布, 并且与南方地区连接成片。适应能力不足致脆型城市主要集中在东北地区 and 青藏高原地区以及其他个别地区。

4 结论与讨论

4.1 结论

通过构建表征高温热浪的系列指标解析了中国主要城市高温特征,并基于社会脆弱性分析框架,从暴露度、敏感性和适应能力3个维度构建评价指标体系,对中国主要城市高温社会脆弱性进行评价,揭示城市高温社会脆弱性的空间分异格局,探讨其致脆原因。结论如下:

(1) 中国极端高温和热浪事件的分布主要集中在南方城市,尤其是在华东和华中地区,北方地区主要分布在新疆和关中平原地区;尽管北方城市极端高温和热浪事件较少,但高温强度较为突出。

(2) 中国城市高温暴露度指数具有明显的空间集聚特征,而各城市的敏感性指数和适应能力指数分布较为分散,空间集聚趋势不显著。

(3) 中国城市高温社会脆弱性指数的空间集聚分布特征明显,高社会脆弱性指数城市主要集中在华东和华中大部分地区,以及西南和华北部分地区;高、中、低社会脆弱性指数城市比例分别为25.3%、46.3%和28.4%,大多数城市以中等社会脆弱性为主。

(4) 社会敏感致脆型、高温暴露致脆型和适应能力不足致脆型城市占比依次为46.9%、44.3%和8.8%;在高社会脆弱性城市中,暴露度指数贡献度最大,中、低社会脆弱性城市中敏感性指数贡献度最大,适应能力指数对城市高温社会脆弱性的贡献度较小。

4.2 讨论

城市社会脆弱性反映的是城市社会系统对外部扰动的一种属性特征。暴露度、敏感性和适应能力作为理解和评估脆弱性的3个维度已经受到许多学者的认同,但在替代性指标的选取以及评价方法的使用上仍具争论。本文主要是从高温社会脆弱性的概念内涵与逻辑框架出发,同时考虑到研究数据的可获得性,以实现不同城市高温社会脆弱性程度的比较与空间可视化。

通过本文研究可以发现,中国城市高温社会脆弱性主要仍受控于自然地理条件,中国南北方分界线奠定了中国城市高温及其社会脆弱性的基本格局。尽管很难改变现有的自然地理格局和城市高温暴露环境,但城市社会系统可以进行主动调整,在城市高温环境难以改变的情形下,提高城市应对高温热浪的适应能力是最主要的现实选择。

西方国家对灾害、气候和环境变化的态度已从被动应对走向主动适应,更多强调社会系统的行为调整以减缓脆弱性的影响。针对高温热浪事件,许多城市制定了相应的行动计划和适应对策,如“英格兰高温规划”、“多伦多高温天气响应规划”、“芝加哥气候行动计划”等。尽管中国在高温天气预警、中暑病例网络直报、户外工作人群保护等方面采取了相关措施,但系统的适应行动以及针对不同空间和群体需求的适应对策尚未形成。城市规划实践方面,由于长期缺乏适应气候变化的意识,致使城市遭受不确定性风险时的抵御、恢复和适应能力严重不足。可喜的是,2017年中国已启动气候适应型城市建设试点,要求城市规划中明确考虑气候变化风险和极端天气事件,但任重而道远。

本文研究仍有待于进一步完善和深化。例如,对已有的国家气象站点数据进一步挖掘,在县域乃至更小尺度上揭示中国高温热浪的时空格局。敏感性指标中,人口的健康状况也是一个重要的表征指标,那些罹患对高温敏感疾病的人群也是显著的高温敏感性群体,但这类数据较难获取。此外,与市域相比,市辖区的人口和社会经济要素集中度更高,加上热岛效应的影响,极端高温的社会后果与脆弱性可能更显著,但市辖区的社

会脆弱性替代指标获取十分所限, 很难实现全国层面的比较分析。作者在下一步研究中将通过选取典型城市开展系统深入的研究, 以进一步完善本文研究内容。

致谢: 评审专家对本研究提出客观、准确、详实的审稿意见, 特致以诚挚感谢。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, 151.
- [2] World Economic Forum. The Global Risks Report 2020. <http://reports.weforum.org/global-risks-report-2020/>, 2020-01-08.
- [3] 秦大河. 中国极端气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015: 3-10. [Qin Dahe. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters. Beijing: Science Press, 2015: 3-10.]
- [4] IPCC. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018, 32.
- [5] Fouillet A, Rey G, Laurent F, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2006, 80(1): 16-24.
- [6] Klinenberg E. Heat Wave: A Social Autopsy of Disaster in Chicago. Chicago: University of Chicago Press, 2015: 121-130.
- [7] Wolf J, Adger W N, Lorenzoni I, et al. Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: An empirical study of two UK cities. *Global Environmental Change*, 2010, 20(1): 44-52.
- [8] Turner II B L, Matsond P A, McCarthy J J, et al. Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8080-8085.
- [9] Adger W N. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 268-281.
- [10] 黄晓军, 王晨, 胡凯丽. 快速空间扩张下西安市边缘区社会脆弱性多尺度评估. *地理学报*, 2018, 73(6): 1002-1017. [Huang Xiaojun, Wang Chen, Hu Kaili. Multi-scale assessment of social vulnerability to rapid urban expansion in urban fringe: A case study of Xi'an. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1002-1017.]
- [11] 美国国家科学院研究理事会. 理解正在变化的星球: 地理科学的战略方向. 刘毅, 刘卫东译. 北京: 科学出版社, 2011: 47-50. [National Research Council. *Understanding the Changing Planet: Strategic Directions for the Geographical Sciences*. Translated by Liu Yi, Liu Weidong. Beijing: Science Press, 2011: 47-50.]
- [12] Cutter S L, Finch C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(7): 2301-2306.
- [13] 黄建毅, 苏飞. 城市灾害社会脆弱性研究热点问题评述与展望. *地理科学*, 2017, 37(8): 1211-1217. [Huang Jianyi, Su Fei. The review and prospect on the hot issues of urban social vulnerability to disasters. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(8): 1211-1217.]
- [14] Galea S, Ahern J, Karpati A. A model of underlying socioeconomic vulnerability in human populations: Evidence from variability in population health and implications for public health. *Social Science & Medicine*, 2005, 60(11): 2417-2430.
- [15] 李鹤, 张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望. *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.]
- [16] 黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 等. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1512-1525. [Huang Xiaojun, Huang Xin, Cui Cailan, et al. The concept, analytical framework and assessment method of social vulnerability. *Progress in Geography*, 2014, 33(11): 1512-1525.]
- [17] Bjarnadottir S, Li Y, Stewart M G. Social vulnerability index for coastal communities at risk to hurricane hazard and a changing climate. *Natural Hazards*, 2011, 59(2): 1055-1075.
- [18] Siagian T H, Purhadi P, Suhartono S, et al. Social vulnerability to natural hazards in Indonesia: Driving factors and policy implications. *Natural Hazards*, 2014, 70(2): 1603-1617.
- [19] Ge Y, Dou W, Zhang H B. A new framework for understanding urban social vulnerability from a network perspective. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1723-1739.

- [20] 周利敏. 社会脆弱性: 灾害社会学研究的新范式. 南京师大学报(社会科学版), 2012, (4): 20-28. [Zhou Limin. Social vulnerability: A new perspective for the study of sociology of hazards. Journal of Nanjing Normal University (Social Science Edition), 2012, (4): 20-28.]
- [21] Wolf T, Chuang W C, McGregor G. On the science-policy bridge: Do spatial heat vulnerability assessment studies influence policy?. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(10): 13321-13349.
- [22] Harlan S L, Brazel A J, Prashad L, et al. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. Social Science and Medicine, 2006, 63(11): 2847-2863.
- [23] Claus R, Dianne P, Kate B, et al. The role of maps in neighborhood-level heat vulnerability assessment for the city of Toronto. The American Cartographer, 2010, 37(1): 31-44.
- [24] 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. Applied Geography, 2015, 63: 231-243.
- [25] Gronlund C J, Berrocal V J, White-Newsome J L, et al. Vulnerability to extreme heat by socio-demographic characteristics and area green space among the elderly in Michigan, 1990-2007. Environmental Research, 2015, 136: 449-461.
- [26] Bradford K, Abrahams L, Hegglin M, et al. A heat vulnerability index and adaptation solutions for Pittsburgh, Pennsylvania. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11303-11311.
- [27] Mushore T D, Mutanga O, Odindi J, et al. Determining extreme heat vulnerability of Harare Metropolitan city using multispectral remote sensing and socio-economic data. Journal of Spatial Information Science, 2017, 63(1): 173-191.
- [28] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价. 地理学报, 2015, 70(7): 1041-1051. [Xie Pan, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1041-1051.]
- [29] 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. 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.]
- [30] 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. 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.]
- [31] 同丽嘎, 李雪铭, 斯琴, 等. 高温热浪暴露风险评价: 以内蒙古包头市为例. 干旱区地理, 2017, 40(2): 284-292. [Tong Liga, Li Xueming, Si Qin, et al. Risk assessment of population exposure to heat wave: A case of Baotou city, Inner Mongolia, China. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 284-292.]
- [32] 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. 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 Environmental Sciences, 2017, 26(4): 635-642.]
- [33] 税伟, 陈志淳, 邓捷铭, 等. 耦合适应力的福州市高温脆弱性评估. 地理学报, 2017, 72(5): 830-849. [Shui Wei, Chen Zhichun, Deng Jieming, et al. Evaluation of urban high temperature vulnerability of coupling adaptability in Fuzhou, China. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 830-849.]
- [34] 祁新华, 程煜, 李达谋, 等. 西方高温热浪研究述评. 生态学报, 2016, 36(9): 2773-2778. [Qi Xinhua, Cheng Yu, Li Damou, et al. A review of the study on heatwaves in western countries. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2773-2778.]
- [35] Ho H C, Knudby A, Chi G Q, et al. Spatiotemporal analysis of regional socio-economic vulnerability change associated with heat risks in Canada. Applied Geography, 2018, 95: 61-70.
- [36] Guo G H, Wu Z F, Xiao R B, et al. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. Landscape and Urban Planning, 2015, 135: 1-10.

Characteristics of urban extreme heat and assessment of social vulnerability in China

HUANG Xiaojun^{1,2,3,4}, WANG Bo¹, LIU Mengmeng¹, GUO Yuhui¹, LI Yanyu¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. Institute of Earth Surface System and Hazards, Northwest University, Xi'an 710127, China; 4. Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Xi'an 710127, China)

Abstract: Human health and social development are significantly affected by urban extreme heat. It is a new proposition for human-land relationship in the field of geography to measure the characteristics and social consequences of urban extreme heat. Applying the tool of social vulnerability to studies of urban extreme heat, this paper takes 296 cities in China as research objects and establishes quantitative indicators of urban extreme heat such as high temperature days, high temperature intensity, heat wave frequency, heat wave duration and heat wave intensity. By using daily maximum temperature data, urban statistics and census data, we systematically analyze the characteristics of urban extreme heat. Meanwhile, we construct a framework for urban social vulnerability to extreme heat and based on this framework, we developed a common evaluation index system of social vulnerability according to the three dimensions of exposure, sensitivity and adaptive capacity. Finally, we conduct social vulnerability assessments for the 296 cities, classify social vulnerability levels, and analyze the causes of urban social vulnerability. The results are shown as follows. (1) The extreme heat events are mainly concentrated in southern cities, especially in the eastern and central parts of the country. Although there are fewer extreme heat events in northern cities, the intensity of high temperature is more prominent. (2) The urban exposure index to extreme heat in China has obvious spatial agglomeration characteristics, while the sensitivity index and adaptability index are scattered. (3) Cities with high social vulnerability index are mainly concentrated in most areas of East and Central China, and in a few areas of Southwest and North China. The proportion of cities with high, middle and low social vulnerability index was 25.3%, 46.3% and 28.4%, respectively. (4) The number of social sensitive cities is the largest, followed by high temperature exposure cities, and the number of insufficient adaptability cities is the smallest. In addition, exposure index contributes the most in cities with high social vulnerability index, and sensitivity index contributes the most in cities with middle and low social vulnerability indexes. This study can provide reference and enlightenment for relationship research between disaster and society, quantitative expression of characteristics of urban extreme heat and assessment of social vulnerability to extreme heat.

Keywords: urban extreme heat; social vulnerability; assessment; exposure; sensitivity; adaptation