

近20年福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱性比较

郑雪梅¹, 王 怡¹, 吴小影¹, 齐 熙¹, 祁新华^{1,2,3*}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007;
3. 福建省湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

摘 要: 高温热浪作为一种常见的气象灾害, 对人们的生产、生活、健康产生很大的影响。为探索福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱差异性及其形成机制, 本文构建了包含暴露性、敏感性、适应性3个维度的高温热浪脆弱性评估模型(Vulnerability Scoping Diagram, VSD)。利用1994-2013年逐日极端高温数据和经济社会统计数据, 分别对处于沿海和内陆的福州和南平市辖区进行高温热浪脆弱性及其3个维度(暴露性、敏感性、适应性)的评估与比较, 并试图解释分析福州市辖区与南平市辖区高温热浪脆弱性的差异及其原因。结果显示: 由于地理环境与社会经济系统的显著差异, 近20年来, 沿海地区高温热浪的脆弱性低于内陆地区, 但随着经济发展导致的敏感性增加, 前者不断攀升的脆弱性可能会超越后者; 内陆地区的人类活动对环境的干扰程度相对较弱, 其敏感性不断降低而适应性有所上升, 使得其高温热浪的脆弱性不断降低。降低高温热浪脆弱性的关键在于同时增强区域适应性与降低敏感性, 这对制定适应性措施具有积极的现实意义。

关 键 词: 高温热浪; 脆弱性; 脆弱性评估模型; 沿海; 内陆; 福建省

1 引言

近几十年来, 由于全球气候变暖、城市化进程加快以及人类活动的强度和范围逐渐扩大, 致使全球范围内的极端高温天气和高温热浪事件频频发生, 并逐步演变成为严重的气象灾害(何杰, 2012), 造成了大量的人员伤亡和经济损失。1995年芝加哥的高温热浪事件导致约800人死亡(Hayhoe, 2010)。2003年, 热浪袭击了欧洲很多地方, 如法国、意大利、西班牙、葡萄牙、英国等, 据不完全统计, 这些国家因热浪直接致死人数均在1000~5000人之间(Abderrezak, 2004; Hémon et al, 2004)。同年, 中国南方也经历了创历史记录的热浪(杨辉等,

2005)。此后, 在2006年入夏以来, 长江中上游及西北部分地区也出现了大范围的高温热浪(陈洪滨等, 2007)。2013年夏季中国南方地区733个站点中就有285个站点出现大于40℃的极端高温(唐恬等, 2013)。高温热浪对人类生产、生活与健康的显著影响, 引起了诸多国际性科学计划和机构(IHDP、IPCC、IGBP等)与学者的广泛关注(IPCC, 2001; GLP, 2005)。Polisky等(2003)利用“八步骤”方法对全球变化脆弱性进行评估, 随后又建立了可比较的全球变化脆弱性评估框架——“VSD(Vulnerability Scoping Diagram)”模型, 并对脆弱性进行系统地评价。Keramitsoglou等(2013)以雅典地区为例, 利用城市气候模型和人造卫星收集的地表数据, 识别容

收稿日期: 2016-01; 修订日期: 2016-07。

基金项目: 教育部人文社会科学项目(14YJCZH112); 福建省科技厅公益类项目(K3-360); 福建省教育厅科技项目(JK2014007)

[Foundation: Humanities and Social Sciences Foundation of Ministry of Education of China, No.14YJCZH112; Public Project of Fujian Provincial Department of Science and Technology, No.K3-360; Project of Fujian Provincial Department of Education, No.JK2014007]。

作者简介: 郑雪梅(1993-), 女, 福建古田人, 硕士研究生, 主要从事人文地理学研究, E-mail: zhengxuemei123456@163.com。

通讯作者: 祁新华(1974-), 男, 福建莆田人, 博士, 教授, 主要从事高温热浪、人文地理与生态学研究, E-mail: fjqxh74@163.com。

引用格式: 郑雪梅, 王怡, 吴小影, 等. 2016. 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, 35(10): 1197-1205. [Zheng X M, Wang Y, Wu X Y, et al. 2016. Comparison of heat wave vulnerability between coastal and inland cities of Fujian Province in the past 20 years[J]. Progress in Geography, 35(10): 1197-1205.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.10.003

易受高温热浪影响的地区,并运用人工智能模糊逻辑模型对高温热浪等级进行归类,最终生成了高温热浪风险地图。中国许多学者关于高温热浪的研究主要集中于高温(气温)的时空变化特征及形成机理(杨周等, 2010; 谈建国等, 2013)、模拟预测(刘珂等, 2011)、城市化与高温热浪关系以及高温热浪对人体健康的影响等方面(李国栋等, 2008; 许遐祯等, 2011; 郑祚芳等, 2012)。在高温热浪脆弱性研究方面也取得了一定成果,如张明顺等(2015)从暴露性、敏感性与适应能力等方面选择高温热浪脆弱性指标,构建高温热浪脆弱评价指标体系,对北京市各区县的高温热浪脆弱性水平进行分析。谢盼等(2015)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,梳理了相应指标体系,并试图通过自然环境、社会经济、居民感知等多元化数据综合表征城市居民高温热浪灾害脆弱性。然而,“暴露—敏感—适应能力”的高温热浪脆弱性评估框架,鲜见用于地域差异显著的沿海与内陆城市高温热浪脆弱性的对比研究。

与此同时,由于不同地区的地理环境、土地利用变化、城市热岛效应等因素对热量收支与扩散的影响不同(张立新, 2006),导致不同地区的高温热浪发生频次及严重程度具有明显差异,而且不同地区对高温热浪的适应能力也不尽相同。因此,针对不同地区进行综合多方面要素的高温热浪脆弱性的对比研究,对探索高温热浪的形成机制以及因地制宜地实行有效措施减缓高温热浪的负面影响具有现实意义。因此,对于脆弱性研究而言,能否建立一个体现区域差异的脆弱性概念框架以及切实可行、可比较的脆弱性评估模型至关重要。基于此,本文在 Polsky 等(2007)构建的 VSD 评估模型基础上,利用包含了“暴露—敏感—适应”3个维度的“脆弱性”分析框架,尝试以福建省南平市辖区(内陆)和福州市辖区(沿海)为研究区,构建可比较的高温热浪的脆弱性评估指标体系,并结合层次分析法、专家打分法,对比分析2个地区近20年来高温热浪脆弱性的演变及差异,试图为高温热浪脆弱性研究提供一个分析框架与实证案例。

2 研究区概况

福建省位于中国东南沿海($23^{\circ}33'N\sim 28^{\circ}20'N$ 、 $115^{\circ}50'E\sim 120^{\circ}40'E$),陆域面积12.4万 km^2 ,现辖1个

副省级城市,8个地级市和1个省直辖综合实验区。2014年常住人口为3806万,人均地区生产总值(GDP)为63472元。

福建省大部分区域属中亚热带,东南部分区域属南亚热带,其突出的地理特点是“依山傍海”,沿海与内陆地区的地理环境迥异,气候特征差异较大。作为经济较为发达的沿海地区,福建省近年来经常遭受高温热浪侵袭。鉴于此,选择位于沿海的福州市辖区与位于内陆的南平市辖区进行高温热浪脆弱性的评估与对比。如图1所示,福州市辖区位于福建省东部沿海,2014年末市辖区面积为1786 km^2 ,属闽江下游河口平原地貌类型;年平均气温为20~25 $^{\circ}C$,最冷月(1-2月)平均气温6~10 $^{\circ}C$;最热月(7-8月)平均气温达33~37 $^{\circ}C$ 。2013年福州成为全国“四大火炉”之首(谭红建等, 2015)。南平市辖区位于福建省中部偏北,建溪、西溪汇合处,地处闽中大谷地最低处,总面积2652.8 km^2 ,以丘林山地为主的地貌特征拦截了部分海洋温暖气流,年平均气温为17.5~19.8 $^{\circ}C$ 。

3 方法与数据

3.1 高温热浪脆弱性评估指标体系

由于高温热浪还没有统一的定义,本文采用中国气象局对高温热浪的定义,以日最高气温 $\geq 35^{\circ}C$ 为高温,连续3天以上的高温天气过程称为高温热浪。脆弱性概念起源于对自然灾害的研究(Jans-

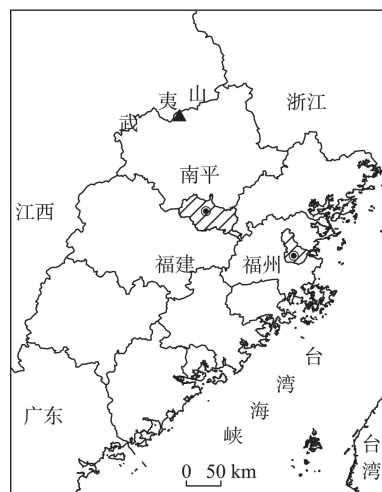


图1 南平市辖区与福州市辖区在福建省的地理位置
Fig.1 Geographical location of Nanping and Fuzhou
in Fujian Province

sena et al, 2006), Timmerman(1981)首先将脆弱性概念引入地学领域。目前脆弱性概念已广泛应用于灾害管理、地质学、生态学、公共健康、贫困和发展、生存和饥荒、气候变化、土地利用、可持续性科学等领域。当然,不同的研究领域对脆弱性概念理解有所不同,Birkmann(2006)至少梳理了25种以上不同的脆弱性定义。在气候变化领域,杨红龙等(2010)将高温热浪的脆弱性定义为热浪的危害程度、对气候或天气变化的敏感程度和适应能力的函数。IPCC(2001)第3次评估报告将脆弱性界定为:“一个自然或社会系统容易遭受或没有能力应对气候变化(包括气候变率和极端气候事件)不利影响的程度,是某一系统气候的变率特征、幅度、变化速率及其敏感性和适应能力的函数”。参照IPCC对脆弱性的定义和解释,目前很多研究认为脆弱性的概念包含3个方面,即暴露性、敏感性和适应性(Wolf et al, 2013; Zhu et al, 2014; El-Zein et al, 2015)。暴露性反映的是某区域的复杂系统所遭受高温热浪的特征、强度、频率或危险程度,当这种程度达到系统所能承受的特定界限时,便会对系统产生影响,通常是不利影响大于有利影响;敏感性是指系统受到高温热浪胁迫,内部结构、功能发生改变的程度,

取决于系统的稳定性;适应性指的是系统对灾害事件的响应与应对能力,以及从灾害损失中恢复的能力,反映了系统缓解、降低灾害损失的程度,主要取决于社会财富、技术、教育、信息、技能、基础设施、稳定能力和管理能力等(Eakin et al, 2006)。

将高温热浪的脆弱性评价指标体系细化为3个层次(表1),分别为:维度层、指标层、参数层。维度层中的暴露性反映发生在特定区域某一时间段内高温热浪的严重程度,以高温指标体现暴露性,高温又可用高温天数、高温热浪频次、高温强度3个指标来衡量。当暴露性达到一定程度,会超过区域承受高温热浪灾害的能力,使区域的脆弱性进一步加大。敏感性体现暴露于高温热浪的人类经济社会系统结构的稳定性,选择了与高温热浪发生相联系的经济发 展、城镇化、城乡居民收入差距、耗水量等指标来说明区域内部系统受到高温热浪的潜在影响程度或趋于改变的可能性。经济发展速度与城市建设水平需要大量基础设施、社会公共服务设施的建设,造成城市内部的土地利用方式发生改变,进而导致城市热岛效应,增加了区域高温热浪产生的概率;与此同时,经济发展速度快、城市建设水平高的区域,自然生态系统自行缓解高温灾害的能力

表1 高温热浪的脆弱性评估指标体系及其权重

Tab.1 Index system for the assessment of vulnerability to heat waves and indicator weights

维度层	指标层	参数层	参数层各指标内涵	指标方向
暴露性(0.32)	高温(1.00)	高温天数/天(0.33)	日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的天数	正向
		高温热浪频次/次(0.33)	连续3 d以上的高温天气过程的次数	正向
		高温强度/ $^{\circ}\text{C}$ (0.34)	该年日最高气温超过 35°C 部分的全年累计数	正向
敏感性(0.34)	经济发展(0.20)	经济增长速度/%(1.00)	反映某一时期内经济增长程度的相对指标	正向
	城镇化(0.20)	建成区面积占土地面积的比重/%(1.00)	反映城市的市中的城市化区域面积相对大小	正向
	城乡居民收入差距(0.30)	城镇居民平均每人全年可支配收入与农村平均每人全年纯收入比值(1.00)	城乡居民收入差距指数,反映区域内部的贫富差距	正向
	耗水量(0.30)	生活用水量/万 t (1.00)	应对高温热浪的需水状况	正向
适应性(0.34)	资金(0.23)	国内生产总值/万元(0.34)	一定时期内,一个国家或地区的经济中所生产出的全部最终产品和劳务的价值,常被公认为衡量国家或地区经济状况的最佳指标	负向
		地方财政收入/万元(0.32)	地方财政年度收入,是地方政府履行其职能的物质保障	负向
		固定资产投资/万元(0.34)	通过固定资产投资,可以提高社会再生产规模,提高社会生产的技术水平,调整经济结构,增强国家或地区的经济实力。	负向
	医疗卫生(0.20)	卫生机构床位数/张(1.00)	反映医疗卫生水平,体现高温热浪引起人员伤亡的应对能力	负向
	科技教育(0.20)	科技教育占财政预算支出比(1.00)	反映辖区对科技、教育的重视程度	负向
	基础设施(0.18)	公路通车里程数/km(1.00)	反映交通便捷程度及区域之间的联系密切程度	负向
	城市绿化水平(0.19)	建成区绿化覆盖率/%(1.00)	可以有效应对城市热岛效应,减缓高温热浪负面影响	负向

注:括号内数字表示相对重要性赋值;正向指标的数值越大(小),对增加高温热浪脆弱性的贡献就越大(小)。

有限,而主要依靠人为措施抵御高温灾害,只能在短期奏效,长期而言整个社会经济系统对高温热浪的敏感性将逐渐提高,易受到高温灾害的干扰。城乡居民收入差距大的区域存在一定数量的贫困人口,这些脆弱人群在高温热浪期间缺乏足够的高温防御物品,易受到高温的侵害,拉高了整个区域高温热浪脆弱性。高温灾害会直接影响耗水量,尤其是生活用水量,因而在高温热浪期间增加了水资源的供给压力,无形中加大了社会高温热浪的敏感性。适应性是指系统调节自身内部的结构来减缓、应对高温热浪,尽量降低灾害影响、损失的能力。将资金、医疗卫生、科技教育、基础设施及城市绿化水平作为衡量适应性的指标。区域的资本量为缓解、适应高温灾害措施的实施提供了有力保障,无论是相关御热、防暑设施的建设,还是医疗卫生、科技教育的投资,都能有效降低高温热浪的脆弱性;交通、通讯等基础设施的完善有利于加强区域间的人员往来与信息流通,在一定程度上能够提高高温热浪的适应性;城市绿化水平的发展,能够降低地表温度,提升区域缓解、适应高温热浪能力。

3.2 高温热浪脆弱性评估的可视化表达

在VSD模型的基础上按照圈层式的数据组织方法来逐级细化评价指标(图2^①)。整个模型从里到外是“脆弱性”、维度层、指标层、参数层的同心圆结构^②。在圆心“脆弱性”的外围是维度层,包括了暴露性、敏感性、适应性3个维度。维度层的外围选取能够解释说明各维度的指标,而最外围的参数层是关于各指标可观察特征的测量值,测量值可根据各地数据的可获取性确定。这种圈层式的表达方式可以直观地体现脆弱性与维度、指标、参数之间的逻辑关系,有助于理解高温热浪脆弱性产生的原因与机理,同时,便于将这种圈层式结构应用于其他类型的脆弱性评估。

3.3 数据来源和处理方法

采用国家气象局发布的福州与南平气象站1994年1月1日-2013年12月31日逐日极端高温资料,计算出年高温日数、高温热浪频次和高温强度以及各项的5年移动平均值;1994-2013年两市市辖区社会经济数据均源自福建省统计年鉴。利用式(1)-(2)对原始数据进行归一化处理,消除量纲的影



图2 高温热浪脆弱性模型示意图

Fig.2 A model of vulnerability to heat waves

响。采用加权求和的方法,由式(3)-(5)层层递进,获取评价价值。首先,分别计算暴露性、敏感性、适应性3个维度层下的各指标值;其次,得到3个维度的评价价值;第三,计算高温热浪脆弱性的综合评价价值。

正向指标公式:

$$X_{ij} = \frac{X_i - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (1)$$

负向指标公式:

$$X_{ij} = \frac{\max X_i - X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (2)$$

式中: X_{ij} 表示第 j 年($j=1, 2, \dots, 20$)第 i 个参数($i=1, 2, \dots, 14$)的归一化值; $\max X_i$ 表示取第 i 个参数数据的最大值; $\min X_i$ 表示取第 i 个参数数据的最小值。然后,通过AHP方法,请8位相关领域专家根据维度层3个维度的因子、指标因子、参数因子的相对重要性赋值并取平均值(表1)。

利用加权综合评价法计算两辖区的高温热浪综合评价价值(脆弱性指数),计算公式为:

$$C_m = \sum_{i=1}^n W_i \times X_{ij} \quad (3)$$

$$Z_j = \sum_{i=1}^n W_k \times C_k \quad (4)$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^3 W_i \times Z_i \quad (5)$$

式(3)中: C_m 是 m 指标层的评价价值; W_i 是各指标下参数 i 的权重; X_{ij} 是第 j 年第 i 个参数的归一化值; n 为指标层下的参数个数。式(4)中: Z_j 表示 j 维度层的评价价值; W_k 是各维度下指标 k 的权重; C_k 为对应指标

①资料来源:参考Polsky等(2003)的VSD图绘制。

②图2为对表1的可视化表达,相当于一个模型,核心在于维度层、指标层、参数层的各参数可根据各地实际情况灵活选取。

评价值; n 是维度层下的指标个数。式(5)中: Q_j 为地区高温热浪脆弱性评价总值; W_i 为维度 i 的权重; Z_i 为对应维度评价值。脆弱性指数越大,说明区域越脆弱,脆弱性指数越小则相反。通过计算结果可知,福州市辖区与南平市辖区20年来的高温热浪脆弱性指数在0.32~0.65之间。参考国内高温热浪脆弱性评价成果(谢盼等, 2015),根据高温热浪脆弱性的计算结果,将高温热浪的脆弱程度划分为微度脆弱(0.3~0.4)、轻度脆弱(0.4~0.5)、中度脆弱(0.5~0.6)、强度脆弱(0.6~0.7)、极度脆弱(0.7~0.8)等5个等级。

4 结果与分析

4.1 暴露性

利用1994-2013年间的高温日数、高温热浪频次和高温强度3个指标来反映福州与南平市辖区高温热浪暴露性的长期变化趋势(图3-5)。近20年来,两辖区的高温日数、高温热浪频次和高温强度的变化趋于一致,均有上升趋势。除了个别年份,位于内陆的南平市辖区各项指标均高于位于沿海的福州市辖区,但二者的差距逐渐缩小,将来福州市辖区各指标有可能超过南平市辖区。

就各年份而言,南平与福州市辖区高温日数最少(9 d)的年份都为1997年,相应地,2003年为两市市辖区高温日数最多的年份,分别为74 d和63 d。20年间两市市辖区年均高温日数分别为41.35 d/a和34 d/a。结合高温日数的5年移动平均曲线,1994-2013年,两市市辖区的高温日数变化趋势大致为先快速上升(1994-2003年)后略微下降(2004-2013年)。

从1994-2013年高温热浪频次5年移动平均值来看,南平与福州市辖区的高温热浪频次均具有较大的起伏变化过程且呈现略微的上升趋势。两市市辖区的年均高温热浪频次分别为4.95次/a和3.95次/a。南平市辖区高温热浪频次的最高值为8次,分别在1991、1994和2010年;而福州市辖区的最高值出现在1991年,同为8次。

南平市辖区与福州市区的年均高温热浪强度分别为57.35℃/a和53.31℃/a,两辖区高温热浪强度最小值同时出现在1997年,分别为3.6℃和6.9℃。南平市辖区与福州市辖区的高温热浪强度最大值也都出现在同一年份(2003年),分别为74℃和63℃。2003年夏季,笼罩亚欧大陆的异常高温使福

建省当年6月下旬以来,出现了持续的高温天气,造成两辖区的高温日数与高温热浪频次达20年间的最大值(谈建国, 2008)。

从图6中可见,除个别年份外,绝大多数年份高温热浪的暴露性指数都在0.2~0.6之间波动。1994-2013年间,福州市辖区大多数年份高温热浪暴露性

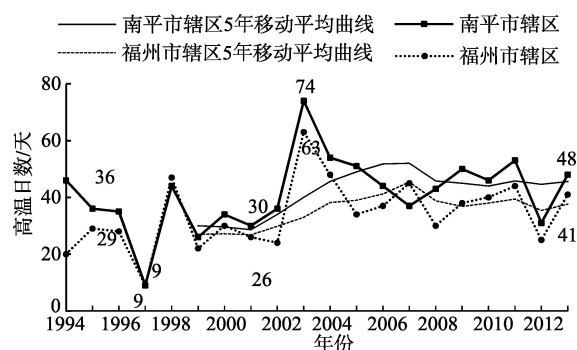


图3 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温日数比较
Fig.3 Comparison of the number of high temperature days between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

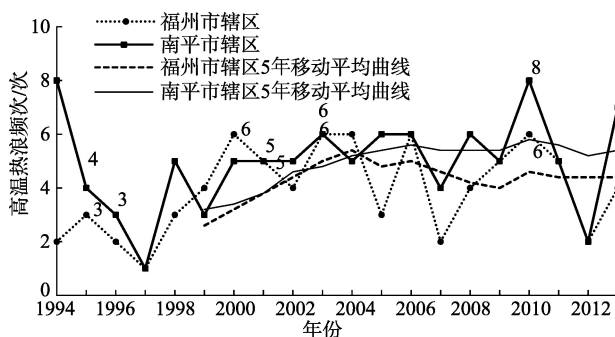


图4 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温热浪次数比较

Fig.4 Comparison of the number of heat wave days between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

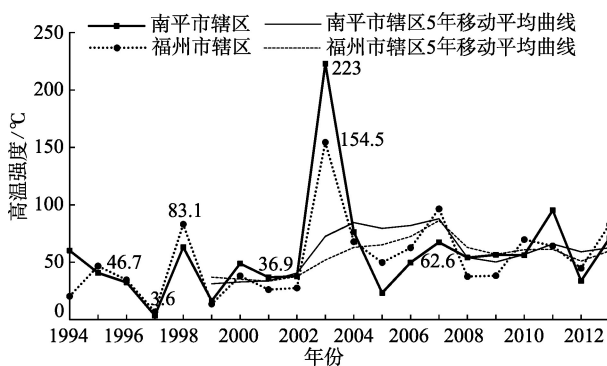


图5 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温强度比较
Fig.5 Comparison of the strength of high temperature between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

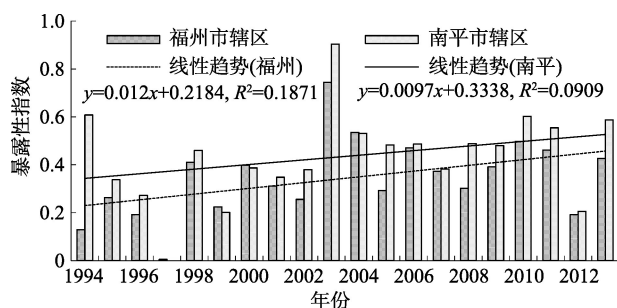


图6 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温热浪的暴露性对比

Fig.6 Comparison of exposure to heat waves between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

指数小于0.3;2004-2013年间,大多数年份则大于0.3。相应地,南平市辖区大多数年份高温热浪暴露性指数分别为0.2~0.4和0.4~0.6之间。虽然两市市辖区高温热浪暴露性指数都在增大,但是指数大小存在显著差异。除1997、1999、2000和2004年外,其余年份福州市辖区高温热浪暴露性指数均小于南平市辖区,说明近20年来福州市辖区高温热浪状况要轻于南平市辖区。虽然两地的夏季气温均受副热带高压影响(叶士琳等, 2015),但福州市辖区属于海洋性气候,夏季气温相对较低,一定程度上削弱了副热带高压的影响,使得其暴露性略低于内陆地区的南平市辖区。

4.2 敏感性

1994-2013年间,福州市辖区与南平市辖区敏感性指数在0.17~0.67之间波动(图7)。福州市辖区高温热浪敏感性指数呈上升趋势且增幅为0.014/a;而南平市辖区则正好相反,下降幅度为0.0015/a。1994-2013年间,福州市辖区高温热浪敏感性指数大于南平市辖区。这是由于地处沿海的福州市辖

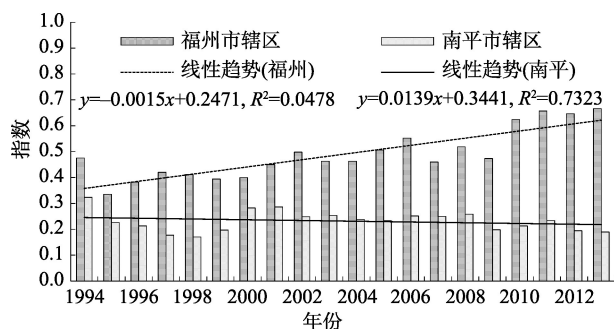


图7 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温热浪的敏感性对比

Fig.7 Comparison of sensibility to heat waves between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

区经济快速发展,进而带动了城市化进程,地区开发强度的增强导致土地利用方式的转变以及生产活动对能源需求量的增大,加之区域内部城乡居民收入差距增大,使得福州市辖区整个社会经济系统易受高温热浪不断增强的影响。而南平市辖区地处内陆山区,受地理位置的影响,社会经济发展和城市化进程相对较慢,城乡居民的收入差距相对较小,因此,整个区域的经济社会系统相对稳定,敏感性较低,受到高温热浪的影响较轻。

4.3 适应性

对于高温热浪的适应程度,福州与南平两市市辖区同样表现出较为明显的差异性(图8)。1994-2013年间,福州市辖区高温热浪适应性指数在0.24~0.69之间,并呈显著上升趋势;而南平市辖区高温热浪适应性指数在0.22~0.42间,呈略微上升趋势。可见,两辖区对高温热浪的适应能力都在增强,且福州市辖区的适应能力在多数年份大于南平市辖区;二者的适应性指数增幅分别为0.024/a和0.008/a,对高温热浪的适应性差距正在不断加大。近20年来,福州市辖区依托沿海的区位优势,加快发展经济和城市化建设,积极完善医疗卫生与基础设施,加大对科技教育的投入,并注重城市绿化空间规划,这对高温热浪的防御及减缓高温热浪的影响有重要意义。而南平辖区的经济实力相对较弱,医疗卫生水平、基础设施还相对欠缺,对城市绿化建设投入不足,因而,应对高温热浪侵袭的能力还较弱。

4.4 脆弱性指数对比

从脆弱性程度看,1994-2013年大多数年份福州与南平市辖区高温热浪脆弱性都属于轻度脆弱。2003年,两市市辖区高温热浪脆弱性都属于强

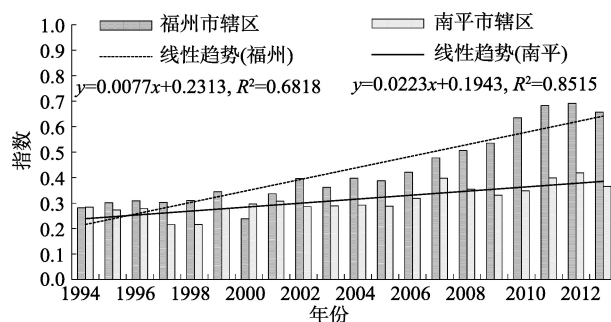


图8 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温热浪的适应性对比

Fig.8 Comparison of adaptability to heat waves between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

度脆弱,而1997与2012年都属于微度脆弱。两市市辖区的高温热浪脆弱性变化趋势存在一定的一致性(图9),大多数年份福州市辖区高温热浪的脆弱性指数低于南平市辖区。近20年来,福州市辖区高温热浪的脆弱性在增强,增强趋势缓慢,幅度约为0.001/a。南平市辖区高温热浪的脆弱性在减轻,而减轻的幅度也较小,幅度约为0.001/a。可见,福州市辖区高温热浪的脆弱性增强速率近似于南平市辖区降低速率,两辖区的脆弱程度差距将会逐渐缩小,未来福州市辖区的高温热浪脆弱性甚至有可能高于南平市辖区。

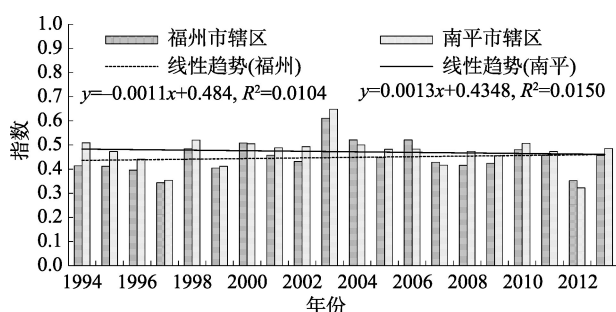


图9 1994-2013年福州市辖区与南平市辖区高温热浪的脆弱性对比

Fig.9 Comparison of vulnerability to heatwaves between Fuzhou and Nanping, 1994-2013

5 结论与讨论

本文构建了地区间可比较的高温热浪脆弱性评估指标体系,以福建省的福州市辖区(沿海)和南平市辖区(内陆)为例,利用1994-2013年逐日极端高温数据和经济社会统计数据,从暴露性、敏感性和适应性3个维度对两地进行高温热浪脆弱性评价与对比。主要结论为:

(1) 从近20年来两市市辖区高温热浪脆弱性的变化趋势来看,沿海地区的高温热浪脆弱性略低于内陆,但是前者呈不断攀升趋势,而后者却呈相反变化趋势,未来前者可能会超过后者。这主要是由于沿海地区高温热浪敏感性显著高于内陆地区,并且二者呈现相反的变化趋势。

(2) 在全球气候变暖的大背景下,沿海和内陆地区高温热浪暴露性均在逐渐增大,同时由于沿海与内陆地理环境特质的差异,二者地形、下垫面、周边环境等存在显著不同,沿海地区暴露程度低于内陆,主要是由于近20年来,高温日数、高温热浪频次

与高温热浪强度方面,沿海地区明显低于内陆地区。

(3) 沿海地区城市化进程迅速,经济、社会急剧变化,但是内部社会经济系统相对不稳定(敏感性高);而内陆地区城市化进程相对较慢,经济发展滞后于沿海地区,对高温的敏感性相对较低。

(4) 1994-2013年间,沿海与内陆城市对高温热浪的适应性都在不断增强,但沿海的适应性指数大于内陆,并且二者的差距呈增大的趋势。经济的发展拉高了沿海地区的敏感性,但同时也因具备了一定经济实力,能从各个层面减缓、适应高温热浪。

本文构建了福州与南平两市市辖区高温热浪脆弱性可比较框架并进行“暴露性—敏感性—适应性”的可视化表达,探讨了高温热浪脆弱性差异及其形成机制,为其他沿海与内陆地区制定高温热浪应对政策提供有益借鉴。值得一提的是,本文在国内率先将VSD模型应用于高温热浪脆弱性评估,研究结果基本符合客观监测数据与个体感知(叶士琳, 2015)。但考虑到国内长时间段连续数据获取的困难,以及中外人口结构与配套医疗设施的差异,本文所构建指标体系与研究框架的适用性仍需要更多案例检验与国际对比研究。

随着社会经济的发展,人类活动对区域环境的影响程度不断增强,高温热浪的区域敏感性将会逐渐增大,因此,人为增强适应性对降低高温热浪的脆弱性具有重要意义。对于高温热浪频发的地区应建立高温热浪的预警、应急体系,同时相关部门应联合建立协同应急预案;加强基础设施建设,确保热浪发生时,城市供水系统与通讯基础设施正常运行。经济较为发达的沿海城市,不能仅以发展经济为导向来规划城市,要注重城市绿化空间规划,尤其是在人口密集、空间有限的中心城区,可酌情考虑垂直绿化与屋顶绿化,以缓解城市高温热浪的影响。城市化进程较为缓慢的内陆地区,要倡导绿色低碳循环的城市化,以此减轻高温热浪对城市发展的不利影响。同时鼓励发展低耗减排的产业,以此增强高温热浪的适应性。

参考文献(References)

- 陈洪滨, 范学花. 2007. 2006年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾[J]. 气候与环境研究, 12(1): 100-112. [Chen H B, Fan X H. 2007. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2006[J]. Climatic and Environmental Research, 12(1): 100-112.]

- 何杰. 2012. 高温热浪诊断分析及应用[D]. 上海: 华东理工大学. [He J. 2012. Diagnostic analysis and application of heat waves[D]. Shanghai, China: East China of Technology.]
- 李国栋, 王乃昂, 张俊华, 等. 2008. 兰州市城区夏季热场分布与热岛效应研究[J]. 地理科学, 28(5): 709-714. [Li G D, Wang N A, Zhang J H, et al. 2008. Urban thermal field and heat island effect of Lanzhou City in summer[J]. Scientia Geographica Sinica, 28(5): 709-714.]
- 刘珂, 许吟隆, 陶生才, 等. 2011. 多模式集合对中国气温的模拟效果及未来30年中国气温变化预估[J]. 高原气象, 30(2): 363-369. [Liu K, Xu Y L, Tao S C, et al. 2011. Validation of multi-model ensemble to air temperature of China and projection of air temperature change in China for the next three decades[J]. Plateau Meteorology, 30(2): 363-369.]
- 谭红建, 蔡榕硕. 2015. 2000年以来福州地区夏季极端高温的新特征及成因探讨[J]. 大气科学, 39(6): 1179-1190. [Tan H J, Cai R S. 2015. New characteristics of heat extremes in Fuzhou since 2000 and the possible causes[J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences, 39(6): 1179-1190.]
- 谈建国. 2008. 气候变暖、城市热岛与高温热浪及其健康影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. [Tan J G. 2008. Global warming, urban heat island, heat wave and human health[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science and Technology.]
- 谈建国, 郑有飞. 2013. 我国主要城市高温热浪时空分布特征[J]. 气象科技, 41(2): 347-351. [Tan J G, Zheng Y F. 2013. Temporal and spatial distribution characteristics of heat waves in main capital cities of China[J]. Meteorological Science and Technology, 41(2): 347-351.]
- 唐恬, 金荣花, 彭相瑜, 等. 2013. 2013年夏季我国南方区域性高温天气的极端性分析[J]. 气象, 40(10): 1207-1215. [Tang T, Jin R H, Peng X Y, et al. 2013. Analysis on extremely high temperature over southern China in summer 2013[J]. Meteorological Monthly, 40(10): 1207-1215.]
- 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.]
- 许遐祺, 郑有飞, 尹继福, 等. 2011. 南京市高温热浪特征及其对人体健康的影响[J]. 生态学杂志, 30(12): 2815-2820. [Xu X Z, Zheng Y F, Yin J F, et al. 2011. Characteristics of high temperature and heat wave in Nanjing City and their impacts on human health[J]. Chinese Journal of Ecology, 30(12): 2815-2820.]
- 杨红龙, 许吟隆, 陶生才, 等. 2010. 高温热浪脆弱性与适应性研究进展[J]. 科技导报, 28(19): 98-102. [Yang H L, Xu Y L, Tao S C, et al. 2010. Vulnerability to heat waves and adaptation: A summary[J]. Science and Technological Review, 28(19): 98-102.]
- 杨辉, 李崇银. 2005. 2003年夏季中国江南异常高温的分析研究[J]. 气候与环境研究, 10(1): 80-85. [Yang H, Li C Y. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over south China in 2003 summer[J]. Climatic and Environmental Research, 10(1): 80-85.]
- 杨周, 林振山. 2010. 北半球过去2000年气温变化的多尺度分析[J]. 地理科学, 30(2): 295-299. [Yang Z, Lin Z S. 2010. Multi-scale analysis of northern hemisphere temperature changes over past two millennia[J]. Scientia Geographica Sinica, 30(2): 295-299.]
- 叶士琳, 祁新华, 程煜, 等. 2015. 城市居民对高温热浪的感知: 基于福州市的调查[J]. 生态学报, 35(20): 6814-6820. [Ye S L, Qi X H, Cheng Y, et al. 2015. A study on the perception of heat waves among urban residents: Based on a survey in Fuzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(20): 6814-6820.]
- 张立新. 2006. 高温热浪的影响及其成因探讨[C]//陕西省气象学会. 陕西省气象学会2006年学术交流会论文集. 汉中: 汉中市气象局: 101-104. [Zhang L X. 2006. Gaowen relang de yingxiang jiqi chengyin tantao[C]//Shaanxi Provincial Meteorological Society. Shaanxisheng qixiang xuehui 2006nian xueshu jiaoliu lunwenji. Hanzhong, China: Hanzhong qixiangju: 101-104.]
- 张明顺, 王义城. 2015. 北京市高温热浪脆弱性评价[J]. 城市与环境研究, (1): 16-33. [Zhang M S, Wang Y C. 2015. Research on evaluation system of heat wave vulnerability in Beijing City[J]. Urban and Environmental Study, (1): 16-33.]
- 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 2012. 城市化对北京夏季极端高温影响的数值研究[J]. 生态环境学报, 21(10): 1689-1694. [Zheng Z F, Gao H, Wang Z W, et al. 2012. Numerical simulation for the urbanization effects on a heat wave event around Beijing City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 21(10): 1689-1694.]
- Abderrezak B. 2004. The 2003 European heat wave[J]. Intensive Care Medicine, 30(1): 1-3.
- Birkmann J. 2006. Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies[J]. Tokyo, Japan: United Nations University Press.
- Eakin H, Luers A L. 2006. Assessing the vulnerability of social-environmental systems[J]. Annual Review of Environment and Resources, 31: 365-394.
- 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.
- Hayhoe K, Sheridan S, Kalkstein L, et al. 2010. Climate

- change, heat waves, and mortality projections for Chicago [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 36(S2): 65-73.
- Hémon D, Jouglé E. 2004. The heat wave in France in August 2003[J]. *Revue Épidémiologie et de Santé Publique*, 52 (1): 3-5.
- IPCC. 2001. *Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Janssens M A, Schoon M L, Ke W M, 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.
- Keramitsoglou I, Kiranoudis C T, Maiheu B, et al. 2013. Heat wave hazard classification and risk assessment using artificial intelligence fuzzy logic[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(10): 8239-8258.
- GLP Science Plan and Implementation Strategy (GLP). 2005. IGBP Report No. 53/IHDP Report No.19[R]. Stockholm, Sweden: GLP.
- Polsky C, Neff R, Yarnal B. 2007. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram[J]. *Global Environmental Change*, 17(3-4): 472-485.
- Schröer D, Polsky C, Patt A. 2003. Assessing vulnerabilities to the effects of global change: An eight step approach[J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 10 (4): 573-595.
- Timmerman P. 1981. *Vulnerability, resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications*[M]. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- 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.
- 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.

Comparison of heat wave vulnerability between coastal and inland cities of Fujian Province in the past 20 years

ZHENG Xuemei¹, WANG Yi¹, WU Xiaoying¹, QI Xi¹, QI Xinhua^{1,2,3*}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

3. Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

Abstract: As one type of meteorological disasters, heat waves have exerted great influences on human production, life, and health. In order to explore the differences of heat wave vulnerability between coastal and inland cities and its formation mechanism, a heat wave Vulnerability Scoping Diagram (VSD) is constructed in this article, which includes three dimensions—exposure, sensitivity, and adaptability. Using the daily extreme highest temperature data from 1994 to 2013 and economic and social statistics, the heat wave vulnerability and its three dimensions, i.e. exposure, sensitivity and adaptability, are assessed and compared respectively between Fuzhou and Nanping, which are located in the coastal and inland area of Fujian Province. It is attempted to explain the vulnerability differences between coastal and inland areas. The result shows that: heat wave vulnerability of the coastal and inland areas had significant differences due to their geographical and socioeconomic differences, and vulnerability to heat waves in the coastal region was lower than that of the inland area in the last 20 years. However, the rising vulnerability of the former may surpass that of the latter in the future as a result of economic development in the coastal area that leads to increased sensitivity. Environmental impact of human activities is relatively weak in the inland region, and vulnerability to heat waves will decrease slowly because of decreasing sensitivity and increasing adaptation. The key to reduce vulnerability to heat waves is to enhance regional adaptability and reduce sensitivity at the same time. This has important implications for designing effective policies.

Key words: heat wave; vulnerability; Vulnerability Scoping Diagram (VSD); coast area; inland area; Fujian Province